慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	動的投資決定のための多期間ポートフォリオ最適化モデル： ヒューマンセキュリティへの基盤研究
Sub Title	
Author	枇々木, 規雄(Hibiki, Norio)
Publisher	慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Publication year	2005
Jtitle	総合政策学ワーキングペーパーシリーズ (Policy and governance working paper series). No.60
JaLC DOI	
Abstract	年金基金などの長期的な資金運用を行う投資家にとって、様々な実務制約のもとで、不確実性を考慮した動的投資政策の決定を明示的にモデル化するためには、多期間モデルを構築する必要がある。本論文では、入力データとしてモンテカルロ・シミュレーションにより生成されたデータを用いつつ、条件付き意思決定を行うことができる多期間確率計画モデルである混合型モデルの一般的な構築方法を再検討し、数値実験によってその特徴を明らかにする。まずはじめに、投資量関数を用いたモデルの定式化を示し、様々な投資戦略を記述できることを示す。次に条件付き意思決定を行うために必要な拡張決定ツリーの生成方法として2つの方法を比較する。これらの定式化および結果を用いて、①分岐数の違いによる比較、②経路数の違いによる比較、③サンプリング・エラーの検討を行い、モデルの特徴を分析する。さらに、基本ケース、相関ケースの2種類の基本統計量を用いて生成したシナリオのもとで、3つの取引戦略（投資量決定戦略、投資額決定戦略、投資比率決定戦略）を比較し、戦略の違いによる最適解の特徴を検討する。
Notes	21世紀COEプログラム「日本・アジアにおける総合政策学先導拠点」
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=BA76859882-00000060-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

総合政策学ワーキングペーパーシリーズ　No.60

動的投資決定のための
多期間ポートフォリオ最適化モデル
—ヒューマンセキュリティへの基盤研究—

枇々木規雄 *

2005 年 4 月

21 世紀 COE プログラム
「日本・アジアにおける総合政策学先導拠点」
慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

本稿は、当該 COE プログラム「金融工学による保険・保証の分析」グループによって 2004 年 3 月 5 日、6 日に開催された「保険・年金リスク研究会」における報告に基づく。尚、本稿の内容を短くしたものが森平爽一郎・小暮厚之共編「保険とヒューマンセキュリティ（仮題）」（朝倉書店より刊行予定）に収録される予定である。

* 慶應義塾大学 理工学部管理工学科（hibiki@ae.keio.ac.jp）

動的投資決定のための多期間ポートフォリオ最適化モデル
—ヒューマンセキュリティへの基盤研究—

枇々木規雄

【概要】

年金基金などの長期的な資金運用を行う投資家にとって、様々な実務制約のもとで、不確実性を考慮した動的投資政策の決定を明示的にモデル化するためには、多期間モデルを構築する必要がある。本論文では、入力データとしてモンテカルロ・シミュレーションにより生成されたデータを用いつつ、条件付き意思決定を行うことができる多期間確率計画モデルである混合型モデルの一般的な構築方法を再検討し、数値実験によってその特徴を明らかにする。まずはじめに、投資量関数を用いたモデルの定式化を示し、様々な投資戦略を記述できることを示す。次に条件付き意思決定を行うために必要な拡張決定ツリーの生成方法として2つの方法を比較する。これらの定式化および結果を用いて、①分岐数の違いによる比較、②経路数の違いによる比較、③サンプリング・エラーの検討を行い、モデルの特徴を分析する。さらに、基本ケース、相関ケースの2種類の基本統計量を用いて生成したシナリオのもとで、3つの取引戦略（投資量決定戦略、投資額決定戦略、投資比率決定戦略）を比較し、戦略の違いによる最適解の特徴を検討する。

キーワード：資産運用、多期間最適化、確率計画モデル、モンテカルロ・シミュレーション

1　はじめに

年金基金などの長期的な資金運用を行う投資家にとって、様々な実務制約のもとで、多期間にわたる不確実性を考慮した動的投資政策の決定を明示的にモデル化するためには、1期間モデルではなく、多期間モデルを構築する必要がある。多期間ポートフォリオ最適化問題を実際に解くためのモデルとしては、シナリオ・ツリーを用いた多期間確率計画モデルが中心となって発展している。シナリオ・ツリー型モデルは近年、コンピュータの高速化と解法アルゴリズムの発展に伴い、大規模な問題を解くことが可能になり、様々な研究が行われている。詳細は、Mulvey and Ziemba[24, 25] の参考文献を参照されたい[1] 。

一方、枇々木 [4] は、離散時間で離散分布に従う確率変数をモンテカルロ・シミュレーションにより発生させたパスを利用して不確実性を記述することによって、数理計画問題として定式化が可能なシミュレーション型多期間確率計画モデルを開発している。さらに、枇々木 [5] は、シミュレーション・アプローチのもとで、シナリオ・ツリーと同様の条件付き意思決定ができるモデルとして、シミュレーション/ツリー混合型多期間確率計画モデルも開発している。

シミュレーション型モデルは、様々なタイプの問題への適用が試みられている。齋藤, 枇々木 [1] は銀行 ALM に、 多田羅, 枇々木 [2] は企業年金の ALM に、枇々木, 茶野 [11] は公的年金の ALM に対し、シミュレーション型モデルを用いて定式化を行い、数値実験によりその有用性を検証している。また、吉田, 山田, 枇々木 [13] は家計の金融資産配分問題に、枇々木, 小守林, 豊田 [9] は生命保険、損害保険を含む世帯の資産形成問題へ適用している。Bogentoft, Romeijn, and Uryasev[15] はオランダの年金基金に対し、混合型モデルの特殊形によって、CVaR(条件付きバリュー・アット・リスク) をリスク尺度に用いた ALM モデルを構築し、その有用性を示している。一方、多期間計画問題は大規模な数理計画問題になるため、計算効率も重要な研究課題である。計算速度を向上させるために、枇々木、田辺 [10] は内点法のナイーブな実装で生じる問題点に対する回避策 (Augmented System Approach[21]) と他の様々な内点法の実装上の技法、特に一次方程式の解法に対する技法を工夫し、また、枇々木 [7] はコンパクト表現による定式化を示している。他にも、枇々木 [6] は、シミュレーション型モデルのモデル化に対し、① サンプリング・エラーの検討、② 投資量関数を用いたモデルによる時系列相関の考慮、③ 1期間ロール・オーバーモデルとの比較、という 3つの点について検討している。

本論文の目的は、入力データとしてモンテカルロ・シミュレーションにより生成されたデータを用いつつ、条件付き意思決定を行うことができる多期間確率計画モデルである混合型モデルの一般的な構築方法を再検討し、数値実験によってその特徴を明らかにすることである。枇々木 [5] は混合型モデルの考え方の提案とその定式化の方法および簡単な数値例を示しているが、モデル

[1] 多期間モデルによるポートフォリオ最適化問題は、Merton[22] と Samuelson[26] によって基本的枠組みが提示されて以来、金融経済学の側面から様々な研究がされている。詳しくは本多 [12] を参照してもらうとして、本論文では数理計画における多期間最適資産配分モデルの構築方法について議論する。

の特徴を十分には検討していなかった。

本論文の構成は以下の通りである。2節では、シミュレーション/ツリー混合型モデルの概要を示し、その定式化を示す。投資量関数を用いたモデルの定式化を示し、投資量関数によって様々な投資戦略を記述できることを示す。混合型モデルを用いるためにその入力データとして必要な ① 資産価格(収益率)シナリオ と ② 拡張決定ツリーの生成方法をそれぞれ 3節と 4節で説明する。拡張決定ツリーの生成方法として2つの方法を示し、それらを数値実験によって比較する。5節では ① 分岐数の違いによる比較、② 経路数の違いによる比較、③ サンプリング・エラーの検討を行う数値実験によってモデルの特徴を分析する。6節では、基本ケース、相関ケースの2種類の基本統計量を用いて生成したシナリオのもとで、数値実験によって3つの取引戦略(投資量決定戦略、投資額決定戦略、投資比率決定戦略)を比較し、戦略の違いによる最適解の特徴を検討する。最後に、7節で結論と今後の課題を述べる。

2　モデル化の基本的な考え方、定式化

2.1　投資の意思決定とモデル化

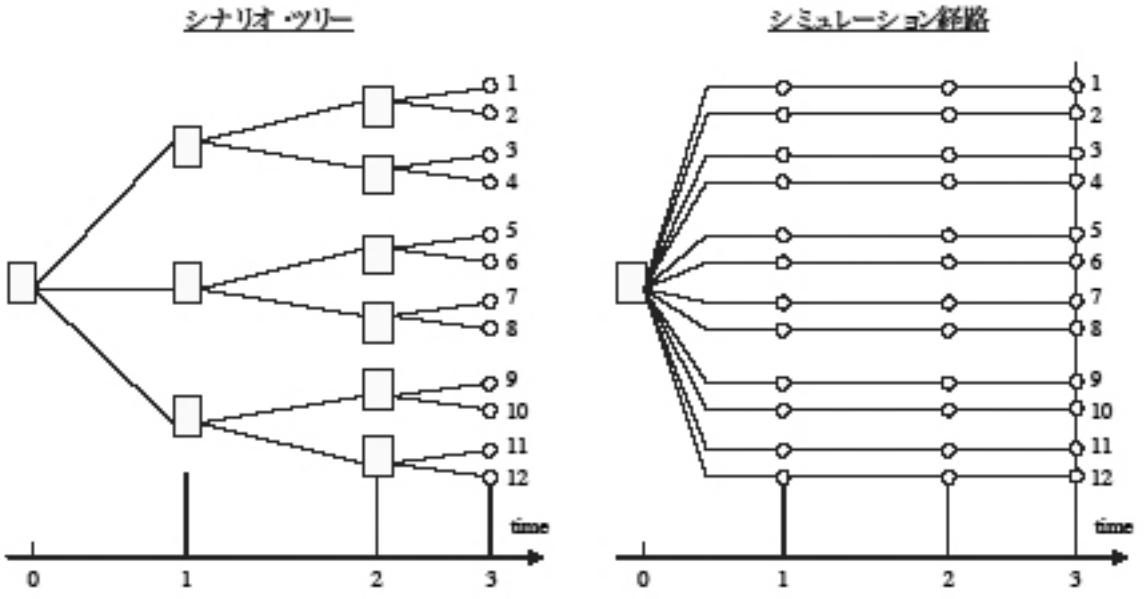

図 1：シナリオ・ツリーとシミュレーション経路

多期間確率計画モデルでは、図1(左)のようなシナリオ・ツリーによって不確実性を離散的に記述し、各ノードにおいて条件付き意思決定を行うモデルが広く使われている。このシナリオ・ツリー型モデルは、離散的な確率変数を用いることによって、定式化上では確定的な数理計画モデルとして記述でき、様々な実務的制約を入れて問題を解くことができる。しかし、不確実性の記述を詳細にしようとすると、問題の規模が指数的に増加するという欠点がある。その一方で、問

題を大規模にしないためには数少ないシナリオでうまく不確実性を記述しなければいけない難しさもある。

一方、将来の資産価格の不確実な変動を図1(右)に示すようなモンテカルロ・シミュレーションによって生成された複数のサンプル・パス(シミュレーション経路)で記述することも広く行われている[2]。確率微分方程式(確率差分方程式)モデルや時系列モデルを作ることができれば、標準的なモンテカルロ・シミュレーションの技法を使うことによって比較的容易にシナリオを生成できる。

しかし、意思決定の取り扱いに関しては注意が必要である。シミュレーション経路は1本の経路にだけ注目すると、t 時点の状態の次に発生する $t+1$ 時点の状態は1つしか想定しないからである。そのため、危険資産に対して各状態ごとに意思決定を行うと、確実性下での意思決定となる(不確実性下での意思決定ではなくなる)。投資決定を行う確率計画モデルでは、将来生じる状態を確定的に知っていることを利用して意思決定ができる機会をなくす条件(非予想条件: non-anticipativity condition)が必要である。そこで、不確実性下での意思決定を保ちつつ、条件付き意思決定を可能にするために、経路をツリー構造でいくつかのグループに分けていき(バンドリングし)、そのグループに属する経路では同一の投資決定に従わせるモデル化の方法を考える。ただし、シミュレーション経路の各状態における現金の保有額は同一になることを要求しない。なぜならば、現金の収益率は金利であり、投資決定時点においては無リスクだからである。このモデルをシミュレーション/ツリー混合型多期間確率計画モデル(簡単のため、混合型モデル)と呼ぶ。

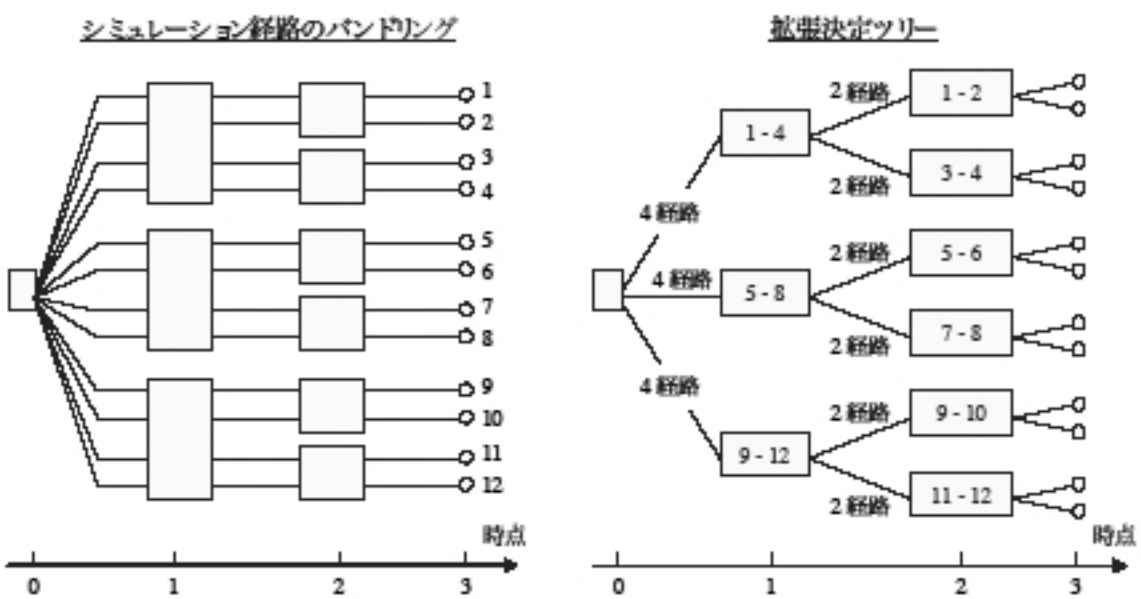

図2: シミュレーション経路と拡張決定ツリー

条件付き意思決定を表すツリーをシナリオ・ツリーや通常の決定ツリーと区別するために、拡張決定ツリーと呼ぶ。たとえば、3期間問題で、シミュレーション経路が12本、1時点で3ノード

[2]数値的にリスク評価を行う場合には、モンテカルロ・シミュレーションで記述する方が一般的である。

(3通りの意思決定)、2時点でさらに2ノードに分かれる(計6通りの意思決定の)拡張決定ツリーを生成することを考えよう。この場合、図2(左)のように、同一の意思決定を行うノードでシミュレーション経路を束ねていき、図2(右)に示す拡張決定ツリーを生成する。図2(右)はツリーをイメージするための図であり、両方の図は同じことを表す。これを 3-2 ツリーと呼ぶ。1時点、2時点、3時点ともに不確実な状態の数は12個に保たれているが、価格の違いによって1時点では3通りの条件付き意思決定、2時点ではそれぞれさらに2通り(合計6通り)の条件付き意思決定を行うことができる。より詳しい拡張決定ツリーの生成方法は、4節で議論する。

ノードで表されるグループに属する状態に対して同一の意思決定を行うとは、ノードごとに設定される決定変数の値をその中のすべての状態に適用することを表す。決定変数として、投資比率、投資額、投資量(投資単位数)を用いることによって取引戦略の違うモデル化を行うことができる[3]。一般に、決定変数が異なれば、異なるモデルを設定する必要があるが、ここでは投資量関数を用いることにより共通のモデルで定式化できる方法を示す。

ノード内で同一の投資比率を適用する場合、各状態において投資比率は同じ値をとるが、投資額や投資量は異なる値をとる。すなわち、投資比率に関しては同一の値を用いた意思決定を行うことになるが、投資額や投資量に関しては同一でない値を用いた意思決定も許している。このことは各ノード内で同一の投資比率をとるという投資ルールさえ与えておけば、各ノード内の投資量は異なる値をとったとしても非予想条件を保つことができることを表す。したがって、投資量を決める(投資ルールを表す)関数を用いて、経路ごとに異なる投資量の値をとるモデル化が可能である。この関数を投資量関数と呼び、投資量のベースを表す基礎変数の関数として記述する。基礎変数が最適化モデルでは決定変数となる。異なる投資量関数を用いることにより、様々な取引戦略を記述することができる。投資比率、投資額、投資量はそれぞれ資産の価格もしくは収益率によって関連付けることができるので、投資量関数を用いて各ノード内で同一の投資比率もしくは同一の投資額を持つような取引戦略をとる(意思決定を示す)ことも可能である。以降は、投資量関数を用いた定式化の方法を示す。

2.2 モデルの定式化

混合型モデルを用いた資産配分問題を記述する。n 個の危険資産 $(j = 1, \ldots, n)$ と現金 $(j = 0)$ に資金を配分する問題を考える。資産0を現金(安全資産)、資産1 〜 資産n を危険資産とする対象資産数が $n + 1$ 個の資産配分問題である。0時点を投資開始時点、T 時点を計画最終時点とする。「同一意思決定を行うノード」を簡単のために「決定ノード」と呼ぶ。

リターン尺度には計画最終時点における富(最終富)の期待値(期待最終富)、リスク尺度には計画最終時点における富の目標水準(目標富)を下回る大きさ(富の不足分)を表す1次の下方部分積

[3]シナリオ・ツリー型モデルの場合には、投資比率、投資額、投資量(投資単位数)のうち、どれを用いても同じ最適解を得ることができるので、取引戦略を考える必要はない。

率を設定する。$W_T^{(i)}$ を経路 i における最終富、W_G を目標富、I を経路数を表すパラメータとすると、離散データを用いた場合の1次の下方部分積率 LPM_1は、(1) 式のように記述できる。

$$\mathrm{LPM}_1 \equiv \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\left|W_T^{(i)} - W_G\right|_- \tag{1}$$

ここで、$|a|_- = \max(-a, 0)$ である。

2.2.1 記号

(1) 集合および添字

s ：決定ノードを表す添字で、時点 (t) とともに記述する。

s' ：任意の時点の決定ノード s につながっている1時点前の決定ノードを表す添字。

V_t^s ：t 時点の決定ノード s に含まれる経路の集合。$|V_t^s|$ は t 時点の決定ノード s に含まれる経路数を表す。

S_t ：t 時点の決定ノード s の集合。

(2) パラメータ

ρ_{j0} ：0時点の危険資産 j の価格。$(j = 1, \ldots, n)$

$\rho_{jt}^{(i)}$ ：t 時点の経路 i の危険資産 j の価格。$(j = 1, \ldots, n;\ t = 1, \ldots, T;\ i = 1, \ldots, I)$

r_0 ：期間 1 (0 時点) の金利。

$r_{t-1}^{(i)}$：期間 t ($t-1$ 時点) の経路 i の金利。$(t = 2, \ldots, T;\ i = 1, \ldots, I)$

W_0：0時点での富 (初期富)。

W_G：計画最終時点での目標富。

W_E：計画最終時点で投資家が要求する期待富。

γ ：リスク回避係数。

(3) 決定変数

z_{j0} ：0 時点の危険資産 j への投資量。$(j = 1, \ldots, n)$

z_{jt}^s ：t 時点の決定ノード s の危険資産 j への投資量のベースを表す基礎変数。
$(j = 1, \ldots, n;\ t = 1, \ldots, T-1;\ s \in S_t)$

$q^{(i)}$：計画最終時点の経路 i の富の目標富に対する不足分。$(i = 1, \ldots, I)$

v_0 ：0 時点の現金。

$v_t^{(i)}$：t 時点の経路 i の現金。$(t = 1, \ldots, T-1;\ i = 1, \ldots, I)$

2.2.2　投資量関数を用いたモデルの定式化

1時点以降の投資量を状態(経路 i) ごとに変えることができるように、z_{jt}^s の投資量関数 $h^{(i)}(z_{jt}^s)$ を以下のように定義する。ここで、$a_{jt}^{(i)}$ を投資量パラメータとする。

$$h^{(i)}(z_{jt}^s) = a_{jt}^{(i)} z_{jt}^s \tag{2}$$

ただし、非予想条件を保つために、$a_{jt}^{(i)}$ の値は、t 時点以降の経路 i (個々の経路) の収益率に依存して設定してはいけない。危険資産に対する様々な取引戦略 (投資ルール) に対する投資量関数を以下に示す。それぞれ各ノードにおける危険資産 j への投資量、投資額、投資比率が同一になるようにリバランス (取引) を行うことを表す。

(1) 投資量決定戦略：$h^{(i)}(z_{jt}^s) = z_{jt}^s$

(2) 投資額決定戦略：$h^{(i)}(z_{jt}^s) = \left(\frac{\rho_{j0}}{\rho_{jt}^{(i)}}\right) z_{jt}^s$

(3) 投資比率決定戦略：$h^{(i)}(z_{jt}^s) = \left(\frac{W_t^{(i)}}{\rho_{jt}^{(i)}}\right) z_{jt}^s$

ここで、$W_t^{(i)}$ は t 時点の経路 i の富を表す。投資量決定戦略と投資額決定戦略は線形計画問題として記述できる。しかし、$W_t^{(i)}$ は決定変数の関数となるため、投資比率決定戦略は非凸非線形計画問題となる。

2.2.3　定式化

期待最終富をある一定以上にするという制約のもとで、最終富の1次の下方部分積率を最小化する多期間最適化モデルは以下のように記述できる。ここでは、このモデルを ER モデルと呼ぶ。

$$\textbf{Minimize} \quad \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} q^{(i)} \tag{3}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{n} \rho_{j0} z_{j0} + v_0 = W_0 \tag{4}$$

$$\left(W_1^{(i)} =\right) \quad \sum_{j=1}^{n} \rho_{j1}^{(i)} h^{(i)}(z_{j1}^s) + v_1^{(i)} = \sum_{j=1}^{n} \rho_{j1}^{(i)} z_{j0} + (1+r_0)v_0, \quad (s \in S_1;\ i \in V_1^s) \tag{5}$$

$$\left(W_t^{(i)} =\right) \quad \sum_{j=1}^{n} \rho_{jt}^{(i)} h^{(i)}(z_{jt}^s) + v_t^{(i)} = \sum_{j=1}^{n} \rho_{jt}^{(i)} h^{(i)}(z_{j,t-1}^{s'}) + \left(1 + r_{t-1}^{(i)}\right) v_{t-1}^{(i)}, \quad (t = 2, \ldots, T-1;\ s \in S_t;\ i \in V_t^s) \tag{6}$$

$$W_T^{(i)} = \sum_{j=1}^{n} \rho_{jT}^{(i)} h^{(i)}(z_{j,T-1}^{s'}) + \left(1 + r_{T-1}^{(i)}\right) v_{T-1}^{(i)}, \quad (s' \in S_{T-1};\ i \in V_{T-1}^{s'}) \tag{7}$$

$$\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} W_T^{(i)} \geq W_E \tag{8}$$

$$W_T^{(i)} + q^{(i)} \geq W_G, \quad (i = 1, \ldots, I) \tag{9}$$

$$z_{j0} \geq 0, \quad (j = 1, \ldots, n) \tag{10}$$

$$z_{jt}^{s} \geq 0, \quad (j = 1, \ldots, n;\ t = 1, \ldots, T-1;\ s \in S_t) \tag{11}$$

$$v_0 \geq 0 \tag{12}$$

$$v_t^{(i)} \geq 0, \quad (t = 1, \ldots, T-1;\ i = 1, \ldots, I) \tag{13}$$

$$q^{(i)} \geq 0, \quad (i = 1, \ldots, I) \tag{14}$$

非負制約式を除く制約式は以下のことを表す。

(4) 式： 0時点での配分決定

初期富 W_0 を用いて、価格 ρ_{j0} の危険資産 j に z_{j0} 単位投資し、残りを現金 v_0 で運用する。

(5) 式： 0時点の配分決定による1時点の経路 i の富と1時点の配分決定

0時点で z_{j0} 単位投資している危険資産 j の1時点での価格は $\rho_{j1}^{(i)}$ であるので、その価値は $\rho_{j1}^{(i)} z_{j0}$ となる。すべての危険資産に対する合計と 0時点からの現金 v_0 の運用分 $(1+r_0)v_0$ を足し合わせたものが1時点での富になり、1時点での配分原資となる。

(6) 式： $t-1$ 時点の配分決定による t 時点の経路 i の富と t 時点の配分決定

同様に、t 時点の経路 i の富は $t-1$ 時点での配分決定をもとにして計算され、t 時点での配分原資となる。

(7) 式： 計画最終時点 (T 時点) における経路 i の富

(8) 式： 期待最終富の下限制約

計画最終時点での富 (最終富) の期待値をある一定以上にするという制約を課す。

(9) 式： LPM_1 の計算に必要な制約式[4]

数値実験では、ER モデルだけではなく、期待最終富から最終富の1次の下方部分積率の γ 倍を差し引いた目的関数を最大化するモデルも用いる。これを EU モデルと呼び、(3), (8) 式の代わりに

[4] (3), (9), (14) 式によって

$$\textbf{Minimize} \quad \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} \left| W_T^{(i)} - W_G \right|_-$$

を表すことができる。

以下の目的関数を最大化する。

$$\text{最大化} \quad EU \equiv \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} W_T^{(i)} - \gamma\left(\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} q^{(i)}\right) \tag{15}$$

2.2.4 対象資産に現金を含める必要性

混合型モデルでは投資比率決定戦略を採らない限り、モデルの構造上、期中において現金への投資を必要とする。したがって、投資量決定戦略や投資額決定戦略では、期中での現金を決定変数として設定しなければならない。この理由はシミュレーション経路上で非予想条件を保つために、各経路において異なる富と危険資産への投資額の違いをすべて現金で保有する必要があるからである (各シミュレーション経路上で現金は異なる)。ただし、0 時点においては必ずしも設定しなくてよい[5]。資産配分問題においては現金を対象資産として含める場合がほとんどであるので、それほど大きな問題ではない。しかし、期中において現金への投資を必要とすることは (内包された) 制約と考えてよいので、この条件には注意が必要である。6.1節の数値実験において、内包する制約がどの程度効くかどうかについて検討を行う。

3 シナリオの生成方法

将来の資産価格 (収益率) は一般に、確率微分方程式 (確率差分方程式) や時系列モデル式などで記述され、それをもとにしてシナリオが生成される。Mulvey and Thorlacius[23] は年金基金に対する多期間確率計画問題に対し、タワーズペリン (Towers Perrin) のモデルを使い、分析を行っている[6] 。このモデルでは、各国間の影響関係と滝構造を用いた経済構造を記述している。各経済変数 (金利、インフレ率、実質利回り、為替レート、株式収益率) は、確率微分方程式で記述される。例えば、短期金利と長期金利は、2 要因 Brennan-Schwartz モデルの変形によって計算される。損害保険会社に対する ALM の代表的な例であるラッセル・安田モデル (Russel-Yasuda Model)[16, 17, 18] では、金利、株式収益率、為替レートをもとにした時系列モデル (ファクターモデル) により資産リターンのシナリオを作成している。

シナリオ生成モデルはそれぞれ独自のものが開発されており、モデルの詳細は完全には記述されていないが、複雑なモデルが多い。これらのモデルを用いて、不確実性の記述をシナリオ・ツリーによって詳細にしようとすると、問題の規模が指数的に増加する。問題を大規模にしないためには、数少ないシナリオでうまく不確実性を記述する必要があるが、これらの論文の中ではその具体的な生成方法は記述されていない。それに対し、混合型モデルでは、その入力データとしてモンテカルロ・シミュレーションによって生成された (ツリー構造ではない) サンプル・パスを用い

[5] 0 時点では状態は確定しているので、現金もある一つの値に決まり、現金を投資対象からはずす (現金を持たないと制約を置く) ことができる。詳しくは、枇々木 [4] を参照されたい。

[6] タワーズペリンはグローバル CAP:Link と呼ばれる資本市場のグローバルなシナリオ生成システムを開発し、年金基金や保険会社のリスク分析等に使っている。

る。確率微分方程式(確率差分方程式)や時系列モデル式が求まれば、モンテカルロ・シミュレーションの標準的な手続きによって、具体的にシナリオを生成することは容易である。したがって、上記に示したシナリオ生成モデルも含めて、様々なモデルから容易にシナリオ生成が可能である。

ここでは、① 簡単で結果を解釈しやすく、② 資産価格変動の時系列相関を明示的に表現する[7]ために、期待値、標準偏差、相関係数(時系列相関も含む)を用いた簡単なモデルによって、n 個の危険資産の収益率と金利のシナリオを生成する。以下、資産0は金利(現金)、資産1〜資産n は危険資産を表す。

① 資産 j の t 時点の収益率(金利の場合には変化率)は、期待値 $\overline{\mu}_{jt}$、標準偏差 σ_{jt} の正規分布に従う。また、ε_{jt} を標準正規分布に従う確率変数とする。標準正規乱数 $\varepsilon_{jt}^{(i)}$ を用いて、シミュレーション経路 i の資産 j の t 時点の収益率 $\mu_{jt}^{(i)}$ を以下のように生成する。

$$\mu_{jt}^{(i)} = \overline{\mu}_{jt} + \sigma_{jt}\varepsilon_{jt}^{(i)},\ (j = 0, \ldots, n;\ t = 1, \ldots, T;\ i = 1, \ldots, I)$$

金利の場合には変化率を表すので、金利 $r_t^{(i)}$ は以下の式を用いて、生成する。

$$\begin{aligned} r_1^{(i)} &= r_0 \times \left(1 + \mu_{01}^{(i)}\right),\ (i = 1, \ldots, I) \\ r_t^{(i)} &= r_{t-1}^{(i)} \times \left(1 + \mu_{0t}^{(i)}\right),\ (t = 2, \ldots, T-1;\ i = 1, \ldots, I) \end{aligned}$$

② 確率変数 ε_{jt} は資産間、時点間で相関を持つ。

$$\varepsilon_{jt} \sim N(\mathbf{o}, \Sigma)$$

ここで、Σ は資産間、時点間の相関係数行列($(n+1)T \times (n+1)T$ 行列)である。

以降の数値実験における対象資産は株式、債券、転換社債(CB)、現金(金利)である。各資産のシミュレーション経路を生成する際に用いるデータの基本統計量(期待値、標準偏差、相関係数行列)として、次の2種類を用いる。

(A) 基本ケース

日興株式パフォーマンスインデックス(東証一部インデックス)、日興債券パフォーマンスインデックス(総合インデックス)、日興CBパフォーマンスインデックス(総合インデックス)、コール・レートをもとに生成した基本統計量を用いる。

(B) 様々な自己相関を考慮するケース(以降、相関ケースと呼ぶ)

様々な時系列相関を持つ場合に対する最適解の違いを調べる。そのために、相関パラメータ c として、表1に示すように-0.5から0.5 の間の 0.1刻みの値を設定した11ケースを比較する。相関パラメータ c は表2に示すように、±1期間の間(期間 t と期間 $t+1$ の間、$t = 1, 2, 3$)の資産間の時系列相関を操作するパラメータで、同時点における資産間の相関係数に対する倍率および、±1期間の間の自己相関係数を表す。また、±2期間の間(期間 t と期間 $t+2$ の間、$t = 1, 2$)の相関係数は ±1期間の間の0.3倍、±3期間の間(期間1と期間4の間)の相関係数は ±2期間の間の0.3倍

[7]時系列相関を考慮することは、多期間モデルにおける大きな関心事の一つである。

と設定する。また、各資産の期待収益率と標準偏差は、それぞれ各期間一定とする (表3)。

表 1：ケース分析番号と相関パラメータ

ケース	cm5	cm4	cm3	cm2	cm1	cp0	cp1	cp2	cp3	cp4	cp5
パラメータ (c)	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

表 2：相関係数行列の設定値

相関係数 (Correlation)

	金利 (t)	株式 (t)	債券 (t)	CB(t)
金利 (t)	1	-0.10	-0.25	-0.15
株式 (t)	-0.10	1	0.15	0.75
債券 (t)	-0.25	0.15	1	0.30
CB(t)	-0.15	0.75	0.30	1

S.C.(± 1)：correlation$\times c$

	金利 ($t+1$)	株式 ($t+1$)	債券 ($t+1$)	CB($t+1$)
金利 (t)	c	$-0.10c$	$-0.25c$	$-0.15c$
株式 (t)	$-0.10c$	c	$0.15c$	$0.75c$
債券 (t)	$-0.25c$	$0.15c$	c	$0.30c$
CB(t)	$-0.15c$	$0.75c$	$0.30c$	c

S.C.：時系列相関 (Serial Correlation), ± 2, ± 3 は省略

表 3：期待収益率と標準偏差

収益率	金利	株式	債券	CB
期待値	0.0%	0.85%	0.6%	0.75%
分散	0.4%	5.5%	1.4%	3.5%

4 拡張決定ツリーの生成方法

4.1 ツリーの生成方法

図1(右) のシミュレーション経路をバンドリングして、図2の拡張決定ツリーを生成する方法 (グループ分けの方法) として、以下に逐次的クラスタリング法とポートフォリオ・ベース・クラスタリング法を説明する。

4.1.1 逐次的クラスタリング法

資産の収益率データを直接的に、逐次的にクラスター分析を行い、グループに分ける方法を逐次的クラスタリング法 (Sequential Clustering Method: 以降、SQC法) と呼ぶ。具体的には, 期間1の収益率を用いてクラスター分析を行い、グループに分ける。さらに、期間2では各グループごとに再度クラスター分析を行い、グループに分ける。このような手続きを時間とともに逐次的に実行する。

4.1.2 ポートフォリオ・ベース・クラスタリング法

多期間にわたって任意のポートフォリオを定め、そのポートフォリオを用いて計算される時点 t の経路 i の富 $W_t^{(i)\star}$ を使って、拡張決定ツリーを作成する方法をポートフォリオ・ベース・クラスタリング法(Portfolio Based Clustering Method: 以降、PBC法)と呼ぶ。用いるポートフォリオとして、① 等ウェイトポートフォリオ、② シミュレーション型モデルで問題を解いたときに得られる最適解[8] などを用いることができる。

4.2 生成方法の違いによる比較

拡張決定ツリーの生成方法によって決定ノードを通る経路が変わるので、最適解も異なる。ここでは数値実験を用いて、生成方法の異なる以下の5通りの方法を比較する。PBC法のノードを通る経路の数は同数にする場合としない場合を検討する。

(1) SQC法

(2) 等ウェイトポートフォリオを用いたPBC法 (W-PBC法)

① ノードを通る経路の数を同数にする場合：WE-PBC

② ノードを通る経路の数を同数にしない場合：WI-PBC

(3) シミュレーション型モデルの最適解を用いたPBC法 (S-PBC法)

① ノードを通る経路の数を同数にする場合：SE-PBC

② ノードを通る経路の数を同数にしない場合：SI-PBC

数値実験の設定条件は以下の通りである。

- 4期間および4資産問題 ($T = 4$, $n + 1 = 4$)
- シミュレーション経路：3,000 本 ($I = 3,000$)
- 乱数シード：100種類
- 基本ケースに対するシミュレーション経路を生成する。
- 投資量決定戦略によるERモデルを用いる。計画期末 (4時点後) の期待富 (W_E) に対する制約値を5ケース設定する。以降、単位のない場合には、すべて万円単位とする。

ケース番号	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5
期待富 (W_E)	$10,280$	$10,310$	$10,340$	$10,370$	$10,385$

[8] Bogentoft, Romeijn and Uryasev[15] は、オランダの年金基金に対し、混合型モデルの特殊形 (以降, BRU モデル) によって、CVaR(条件付きバリュー・アット・リスク) をリスク尺度に用いたALMモデルを構築し、その有用性を示している。BRU モデルは決定ノードが時間とともに広がらない (増えない) 構造を持つ混合型モデルであるが、ノードの決定方法として、シミュレーション型モデルで問題を解いたときに得られる最適解から計算される資産負債比率を使っている。BRU モデルは枇々木[5] を参考にして研究されたが、本論文ではそのアイデアを一般化し、ポートフォリオ・ベース・クラスタリング法と呼ぶ。

4.2.1 結果と考察

表 4：各方法の比較：リスクの平均値

	$W_E =$	$10,280$	$10,310$	$10,340$	$10,370$	$10,385$
(1)	SQC	6.10	16.40	33.62	69.33	110.10
(2)-①	WE-PBC	5.19	13.83	27.57	54.27	86.24
(2)-②	WI-PBC	5.21	13.95	28.42	58.06	96.45
(3)-①	SE-PBC($\gamma = 1.5$)	1.42	6.01	13.91	28.18	41.05
(3)-②	SI-PBC($\gamma = 1.5$)	1.23	5.74	14.16	28.98	42.92

各方法のリスクの平均値を表4に示す。シミュレーション型モデルの最適解を用いたPBC法(S-PBC法)が他の方法に比べて明らかに良い。ただし、S-PBC法(SE-PBC, SI-PBC)では $\gamma = 1.5$ のケースを示す[9]。紙面の都合上省略したが、リスク値の標準偏差も小さく、分布全体を見ても、S-PBC法のリスクの最大値は他の方法のリスクの最小値を下回っており、100種類すべてのケースで有利である。この理由はシミュレーション型モデルと混合型モデルの構造はきわめて似ているため、シミュレーション型モデルで得られた富の値は、値そのものの水準は異なるものの、パスごとの大きさの順番は他の方法よりも似た結果が得られるからである。SE-PBC法とSI-PBC法の結果を比較するとほぼ同じ結果が得られている。詳細に見ると、平均値に関しては、$W_E = 10,280, 10,310$ の2ケースでは SI-PBC法が、$W_E = 10,340, 10,370, 10,385$ の3ケースでは SE-PBC法が良い結果を示している。標準偏差はあまり変わりない。SI-PBC法とSE-PBC法は結果がほとんど変わらないので、以降では SE-PBC法を用いて分析を行う。

4.2.2 SE-PBC法におけるリスク回避係数(γ)の選択

表 5：様々なリスク回避係数(γ)に対するリスクの平均値

γ	$W_E = 10,280$	$W_E = 10,310$	$W_E = 10,340$	$W_E = 10,370$	$W_E = 10,385$
1000	1.941	7.141	16.007	32.080	47.550
100	1.917	7.061	15.861	31.708	46.801
10	1.547	6.287	14.455	29.045	42.426
5	1.530	6.208	14.259	28.718	41.806
3	1.540	6.253	14.346	28.935	42.116
2	1.475	6.139	14.161	28.669	41.645
1.75	1.443	6.073	14.040	28.416	41.334
1.50	1.416	6.012	13.907	28.183	41.052
1.25	1.431	6.048	13.982	28.163	40.924
1	1.556	6.325	14.448	28.945	42.104
0.75	1.826	6.894	15.396	30.274	43.763
0.50	2.646	8.631	18.354	35.098	51.671
0.25	5.787	15.237	30.629	61.691	99.829

13種類の γ に対して、SE-PBC法を用いて混合型モデルで問題を解いた場合のリスクの平均値

[9]表5、表6 の結果より、リスクの平均値が小さい $\gamma = 1.5$ のケースを用いる。

を表5に示す。表5を見ると、$W_E = 10,280,\ 10,310,\ 10,340$ の3ケースでは $\gamma = 1.50$ 、$W_E = 10,370,\ 10,385$ の2ケースでは $\gamma = 1.25$ のときのリスク値が最も低い。しかし、γ の値が 1〜10 の範囲ではそれほど大きな変化がない。この範囲の中では γ に対する感度は高くないが、それは γ の変化に対し、シミュレーション型モデルの最適ポートフォリオが変化していないからではない[10]。PBC法では各経路ごとの富の順番が問題であるため、ある範囲の中ではポートフォリオが多少異なっていてもそれほど感度は高くないことが予想される。$\gamma = 0.50$ で急にリスク値が悪くなるが、これは $\gamma = 0.75$ のときに比べて、債券への投資比率が10%程度落ちていて、この点で富の順番に影響を与えるようなポートフォリオの変化があったと推測できる。一方、$\gamma = 100$ 以上になると $\gamma = 10$ のときに比べてリスク値が悪くなる。現金の投資比率が10%程度下がり、その分、債券への投資比率が増えているが、この点で富の順番に影響を与えるようなポートフォリオの変化があったと推測できる。いずれにしても、いくつかの γ に対して実際に問題を解いてから、γ を決め、混合型モデルを解くことが必要である。

シミュレーション経路を10,000本にした場合も表6のように同様の結果が得られる。表6は、$\gamma = 0.75$〜3 に対する結果であるが、$\gamma = 0.75$ 以外はほぼ同じ値になり、この範囲では感度があまり高くないことを示す。$\gamma = 1.50$ の場合のリスク値が最小であったので、以降の数値実験においては $\gamma = 1.50$ を用いる。

表 6：様々な γ に対する混合型モデルのリスクの平均値 ($I = 10,000$ の場合)

γ	$W_E = 10,280$	$W_E = 10,310$	$W_E = 10,340$	$W_E = 10,370$	$W_E = 10,385$
3	3.313	9.262	19.019	38.062	60.554
2	3.237	9.127	18.844	37.785	59.955
1.75	3.217	9.084	18.776	37.680	59.729
1.50	3.135	8.941	18.531	37.319	59.021
1.25	3.158	9.002	18.610	37.410	59.124
1	3.352	9.377	19.235	38.388	61.223
0.75	3.785	10.178	20.475	40.344	65.564

5 モデル分析

混合型モデルは、モンテカルロ・シミュレーションを用いることによって、シナリオ・ツリーよりも離散化の精度を上げる (不確実性の記述を詳細にする) ことができる。しかし、不確実性下での条件付き意思決定を行うために、似たような資産価格 (収益率) の状態に対して同一の意思決定を行う必要がある。したがって、シミュレーション経路数と意思決定ノード数 (分岐数) は結果に大きな影響を及ぼす。経路数が多くなればなるほど分布の近似精度は高まり、意思決定ノード数 (分岐数) が多くなればなるほど、より適切に条件付き意思決定を記述することができる。経路

[10] γ が小さくなるにつれて、リスク許容度が大きくなり、より危険な資産へと移行する。紙面の都合上省略するが、γ が小さくなるにつれて、現金への投資は減り、株式、債券、CBへの投資が徐々に増えていく。さらに γ が小さくなると、現金への投資はなくなり、債券への投資も減り、株式とCBへ投資をすることになる。

数を一定にして、意思決定ノード数(分岐数)を増やすと効率的フロンティアは左上にシフトする。この理由は、経路数が少なくて意思決定ノード数が多いと、分布の近似精度が悪いもとで意思決定をすることになり、オーバーフィットさせることができるからである。一方、意思決定ノード数(分岐数)を一定にして、経路数を増やすと効率的フロンティアは右下にシフトする。この理由は、経路数が多くて意思決定ノード数が少ないと、条件付き意思決定の自由度が低くなるからである。また、モンテカルロ・シミュレーションでは乱数を用いるため、経路数が少ないとサンプリングエラーが生じる。経路数を増加させることによって、サンプリングエラーを減少させることができる。本節ではこれらの関係を数値実験により調べることにする。

以降の数値実験は、特に断りのない限り、以下のような設定条件のもとで、4期間、4資産問題に対して行う($T = 4$, $n + 1 = 4$)。計算機はIBM ThinkPad, Pentium IV 1.8GHz, 768MB メモリ、数理計画ソフトウェアは NUOPT Ver. 5.1.0a((株)数理システム)を用いる。

- 初期時点での資産価格はすべて 1 とする(一般性を失わない)。また、初期金利は 0.44%(1期間) とする。
- 初期(時点の)富(W_0)は1億円とする。
- 計画期末(4時点後)の目標富(W_G)は 1億円とする。
- 分岐数による比較実験(5.1節)を除き、決定ノードの分岐数は、1時点を5個、2時点を4個、3時点を3個とする(5-4-3 ツリー)。決定ノード数は、1時点が5個、2時点が20個、3時点が60個となる。
- 経路数による比較実験(5.2節)、サンプリング・エラーの実験(5.3節)を除き、経路数は 10,000 本とする。

本節では以下の3種類の数値実験を行う。

<u>実験 1</u>: 経路数を一定にして、意思決定ノード数(分岐数)を様々に変更する。以下のような3通りの方法で比較する。

(1) 1-1-1 ツリー(シミュレーション型モデル)から 5-4-3 ツリーまで、1つの時点の分岐数のみを変えていった場合の以下の12種類の拡張決定ツリーに対する結果を比較する。

(2) 各時点の分岐数を同一にする12種類の N-N-N ツリー($N = 2, \ldots, 13$) に対する結果を比較する。

(3) 以下のような3時点($T - 1$時点)でのノード数を同一(M個)のツリー構造を持つ N_1-N_2-N_3 ツリー ($N_1 \times N_2 \times N_3 = M$) の結果を比較する。

- M =1,000個: 10-10-10, 20-10-5, 40-5-5
- M =1,500個: 15-10-10, 20-15-5, 30-10-5, 60-5-5

- M =2,000 個：20-10-10, 20-20-5, 40-10-5, 80-5-5
- M =2,500 個：25-10-10, 25-20-5, 50-10-5, 100-5-5
- M =3,000 個：30-10-10, 30-20-5, 60-10-5, 120-5-5

<u>実験 2</u>：意思決定ノード数 (分岐数) が一定のツリー (5-4-3 ツリー) に対して、経路数を様々に変更する。異なる 6 種類のシミュレーション経路 (1,000 本, 3,000 本, 5,000 本, 7,000 本, 10,000 本, 15,000 本) に対する結果を比較する。

<u>実験 3</u>：異なる 100 種類の乱数シードおよび 6 種類の経路数の収益率データセットに対する結果を比較する。

その他の設定条件は以下の通りである。

- 基本ケースに対するシミュレーション経路を生成する。
- 投資量決定戦略を用いる。
- 実験 1 および実験 2 には EU モデルを用いる。以下の 16 種類のリスク回避係数に対する問題を解く。

  (a) $\gamma = \infty$ (リスク最小化問題)

  (b) $\gamma = 10, 5, 4, 3, 2, 1.5, 1, 0.8, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1$

  (c) $\gamma = 0$ (期待富最大化問題)

  また、実験 3 には ER モデルを用いる。計画期末 (4 時点後) の期待富 (W_E) に対する制約値として、4.2節と同じ 5 種類を用いる。

5.1 実験 1：分岐数の違いによる比較

(1) 1 つの時点の分岐数のみを変えていった場合

1-1-1 ツリー (シミュレーション型モデル) から 5-4-3 ツリーまで、1 つの時点の分岐数のみを変えていった場合の 12 種類の拡張決定ツリーに対する効率的フロンティアを図 3(左) に示す。シミュレーション型モデル (1-1-1 ツリー) に比べて、1 時点目にのみ条件付き意思決定を入れた 2-1-1 ツリーの効率的フロンティアは急激に左上にシフトする。2 時点目、3 時点目にそれぞれ条件付き意思決定を加えた 2-2-1 ツリー、2-2-2 ツリーの場合も同様に大きく左上にシフトする。しかし、2-2-2 ツリーの場合より大きい分岐数にしてもそれほど大きくシフトせずに徐々に左上にシフトするのみである。このことから、条件付き意思決定の有無が大きく影響すること、ある程度分岐数を増やすと少しずつ分岐数を変えただけではあまり大きく変化しないことがわかる。紙面の都合上、結果は省略するが、各分岐数ごとの 0 時点の最適投資比率を見ると、1-1-1 ツリー (シミュレーション型モデル)、2-1-1 ツリー, 2-2-1 ツリーの結果が他の値と少し離れているが、それを除くとほぼ同じような値を示している。

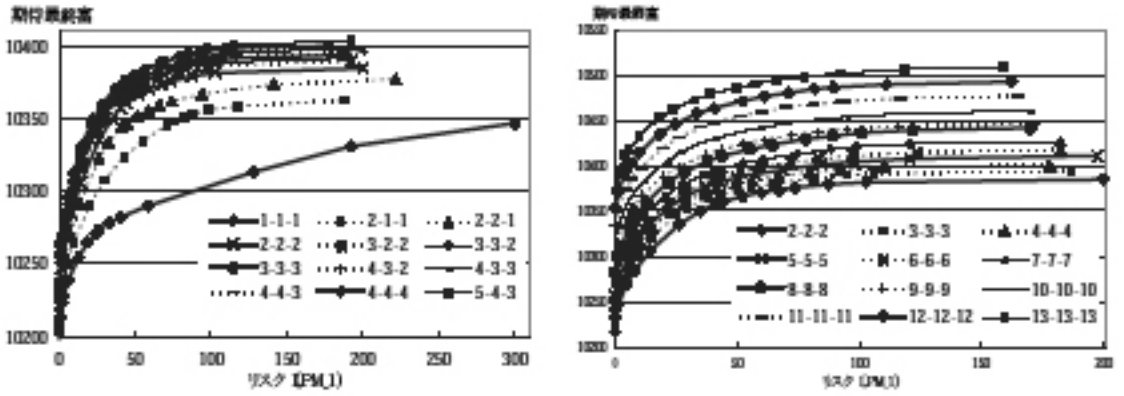

図 3：効率的フロンティア

(2) 各時点の分岐数を同一にする *N-N-N* ツリーの場合

各時点の分岐数を同一にする12種類の *N-N-N* ツリーに対する効率的フロンティアを図3(右)に示す。分岐数を増加させると、図3(左)と同様に、効率的フロンティアが左上にシフトする。しかし、分岐数の増加割合が大きいため、図3(左)よりも大きくシフトする。また、徐々に最大リスク値も低下する。紙面の都合上、結果は省略するが、各分岐数(ツリー)ごとの0時点の最適投資比率を見ると、分岐数を増加させるに従って、より危険な資産であるCB や株式の投資比率が徐々に増加している。この理由は、分岐数が増加すると、期待富を増加させるために、0時点においてより危険な資産に投資したとしても1時点以降のノード数が増加し(意思決定の自由度が高まり)、リスクを十分にコントロールできるからである。

(3) 3時点($T-1$ 時点)でのノード数が同一の場合

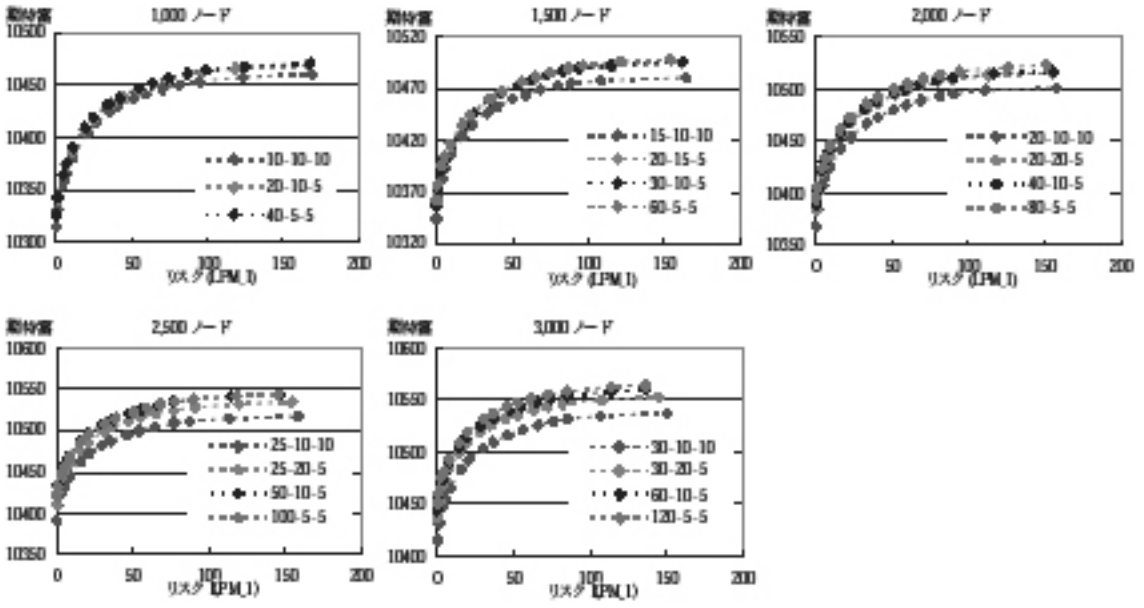

図 4：ノード数が同一の場合の効率的フロンティア

3時点 ($T-1$時点) でのノード数を同一にするという条件のもとで、分岐方法を変えていった場合の5種類のノード数に対する効率的フロンティアを図4に示す。

図4から下記のように各ノード数ごとにいくつかのグループに分けることができる。

ノード数	ツリー構造 (2時点のノード数)			
1,000個	10-10-10(100)	20-10-5(200), 40-5-5(200)		
1,500個	15-10-10(150)	20-15-5(300), 30-10-5(300), 60-5-5(300)		
2,000個	20-10-10(200)	20-20-5(400), 40-10-5(400)	80-5-5(400)	
2,500個	25-10-10(250)	25-20-5(500)	50-10-5(500), 100-5-5(500)	
3,000個	30-10-10(300)	30-20-5(600)	60-10-5(600), 120-5-5(600)	

設定したツリーの違いによって、以下の組み合わせで比較を行う。

① 1時点と2時点のノード数がともに異なる組み合わせ

ノード数	比較するツリー	
1,000個	10-10-10(100) , 20-10-5(200)	10-10-10(100) , 40-5-5(200)
1,500個	15-10-10(150) , 20-15-5(300)	15-10-10(150) , 30-10-5(300)
	15-10-10(150) , 60-5-5(300)	
2,000個	20-10-10(200) , 40-10-5(400)	20-10-10(200) , 80-5-5(400)
2,500個	25-10-10(250) , 50-10-5(500)	25-10-10(250) , 100-5-5(500)
3,000個	30-10-10(300) , 60-10-5(600)	30-10-10(300) , 120-5-5(600)

② 1時点のノード数は同じだが、2時点のノード数が異なる組み合わせ

ノード数	比較するツリー
2,000個	20-10-10(200) , 20-20-5(400)
2,500個	25-10-10(250) , 25-20-5(500)
3,000個	30-10-10(300) , 30-20-5(600)

③ 1時点のノード数は異なるが、2時点のノード数は同じ組み合わせ

ノード数	比較するツリー
1,000個	20-10-5(200) , 40-5-5(200)
1,500個	20-15-5(300) , 30-10-5(300) , 60-5-5(300)
2,000個	20-20-5(400) , 40-10-5(400) , 80-5-5(400)
2,500個	25-20-5(500) , 50-10-5(500) , 100-5-5(500)
3,000個	30-20-5(600) , 60-10-5(600) , 120-5-5(600)

経路数が同じであるため、将来時点でのノード数が多いほど、ノードを通る経路数が減少し、効率的フロンティアは左上にシフトする。効率的フロンティアは ① の場合に最も異なるが、② の場合も同様に異なる。一方、③ の場合には似た効率的フロンティアが得られる場合が多い。③の場合、1時点のノードを通る経路数は異なるが、1時点ではノードを通る経路数が多いため、②の場合のように、2時点で異なるよりも影響は小さいと考えられる。

5.2　実験２：経路数の違いによる比較

異なる６種類の経路数に対する効率的フロンティアを図5に示す[11]。

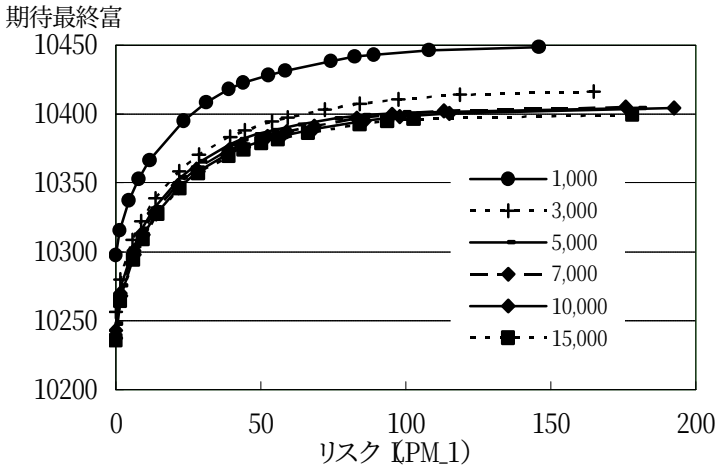

図５：様々な経路数に対する効率的フロンティア

経路数 1,000 本に比べて 3,000 本の場合の効率的フロンティアは大きく右下にシフトする。5,000 本, 7,000 本, 10,000 本、15,000 本となるにつれて、右下にシフトするが、その幅は徐々に狭くなる。紙面の都合上、結果は省略するが、経路数が異なっても、γの変化に伴う各資産ごとの０時点の最適投資比率はそれほど変わらない。1,000 本の場合、他の値と少し離れているが、それを除くとほぼ同じような値を示している。

5.3　実験３：サンプリング・エラーの検討

乱数シードおよび経路数の異なる 100 種類の収益率データセットに対する最適解を求め、その最適解の分布を調べる。そして、経路数が増加することによって最適解の分布に関する統計量がどのように変化するかを調べる。

図6に５種類の期待富の水準に対する６種類の経路数とリスク値の関係を示す。５本の線はそれぞれ上から 100 種類の最適解の最大値、75% 点、50% 点、25% 点、最小値を表す。図6の右下図は、６種類の経路数と平均リスク値の関係を示す。

[11]経路数が異なると、乱数シードが同じでも全く異なる収益率データセットを生成するために、サンプリング・エラーの問題が生じ、直接比較することは難しい。そこで、乱数シードを同じにせずに、経路ごとにそのリスク値が5.3節で計算した100種類のリスク値の平均値に最も近い値を持つ乱数シードを用いる。サンプリング・エラーの問題は5.3節で検討する。

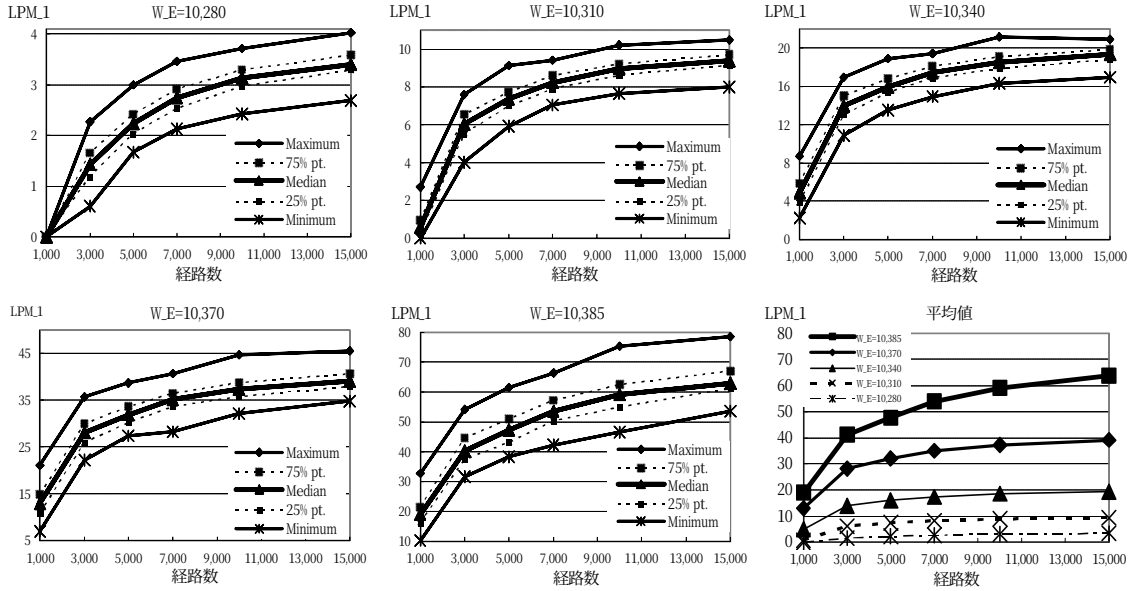

図 6：経路数とリスク値 (LPM_1) の関係

5.2節でも示したように、経路数が増加すると効率的フロンティアは右下にシフトする。図6を見ると、経路数が15,000本までは経路数を増加させても、リスク値は収束するようには見えない。しかし、徐々にその傾きは小さくなっていくので、さらに経路数を増加させると、平均値はある一つの値に収束することが期待される。一方、標準偏差の値は平均値が収束しないため、経路数を増加させても小さくはならない。しかし、リスク値の水準が大きくなっているので、相対的に見ると (変動係数で見ると) ばらつきは徐々に小さくなる。枇々木 [6] のシミュレーション型モデルに対するサンプリング・エラーの数値実験と比べてみよう。期間数は3期間であるが、シミュレーション型モデルの場合、乱数シード100種類のリスクの平均値は、経路数が500本でも10,000本でも近い値である。また、経路数を増加させると、サンプリング・エラー (標準偏差) を減少させることができる。しかし、混合型モデルの場合は、経路数15,000本でも乱数シード100種類のリスクの平均値が収束せず、標準偏差もあまり改善しない。経路数が少ない場合、サンプリング・エラーの問題はシミュレーション型モデルよりも、十分に考慮して意思決定を行う必要がある。この数値実験に用いた 5-4-3 ツリーでは経路数が15,000本の場合、3時点では各決定ノードに対し、250本の経路によって不確実性を記述する。サンプリング・エラーを減少させるためには、より多くのシミュレーション経路が必要である。数値実験に用いた計算機では、経路数は15,000本が限界のため、経路数を固定するならば、分岐数を減らす (ツリーを小さくする) ことにより、サンプリング・エラーを減少させることができると考えられる。このことを確かめるためには、今後様々な分岐数 (ツリー) に対して同様の実験を行う必要がある。

次に、0時点における最適投資比率の平均値と標準偏差を表7に示す。

表 7：最適投資比率の平均値と標準偏差 (0時点)

平均値							標準偏差						
株式	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000	株式	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000
$W_E = 10,280$	2.0%	1.9%	2.1%	2.5%	2.5%	2.5%	$W_E = 10,280$	1.7%	1.1%	0.8%	0.8%	0.6%	0.6%
$W_E = 10,310$	2.1%	2.6%	2.9%	3.0%	3.1%	3.2%	$W_E = 10,310$	1.9%	1.3%	0.9%	0.9%	0.7%	0.5%
$W_E = 10,340$	2.8%	3.4%	3.8%	3.8%	4.1%	4.3%	$W_E = 10,340$	2.0%	1.5%	1.0%	1.0%	0.8%	0.7%
$W_E = 10,370$	3.8%	5.2%	5.8%	6.0%	6.3%	6.7%	$W_E = 10,370$	2.2%	1.7%	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%
$W_E = 10,385$	4.8%	6.7%	7.5%	8.5%	8.5%	8.4%	$W_E = 10,385$	2.8%	1.8%	1.5%	1.3%	1.4%	1.3%
債券	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000	債券	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000
$W_E = 10,280$	28.8%	32.0%	34.9%	36.1%	37.0%	37.9%	$W_E = 10,280$	5.6%	3.7%	2.7%	2.4%	2.0%	1.7%
$W_E = 10,310$	30.2%	42.3%	44.5%	45.7%	46.6%	47.7%	$W_E = 10,310$	7.0%	4.1%	2.8%	2.8%	2.4%	2.2%
$W_E = 10,340$	40.5%	53.3%	56.7%	58.3%	59.7%	61.1%	$W_E = 10,340$	6.8%	4.7%	3.4%	3.0%	3.2%	2.6%
$W_E = 10,370$	53.3%	63.4%	61.0%	58.6%	56.6%	54.8%	$W_E = 10,370$	7.9%	2.6%	3.0%	2.5%	2.7%	2.6%
$W_E = 10,385$	60.5%	52.5%	45.7%	37.8%	30.7%	24.1%	$W_E = 10,385$	6.9%	5.6%	7.3%	6.1%	6.6%	5.8%
CB	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000	CB	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000
$W_E = 10,280$	10.7%	14.1%	15.0%	15.0%	15.4%	15.5%	$W_E = 10,280$	2.9%	2.2%	1.5%	1.4%	1.1%	0.9%
$W_E = 10,310$	14.1%	18.2%	19.0%	19.2%	19.5%	19.7%	$W_E = 10,310$	3.2%	2.3%	1.7%	1.5%	1.2%	1.0%
$W_E = 10,340$	18.8%	23.1%	24.0%	24.7%	25.1%	25.3%	$W_E = 10,340$	3.4%	2.7%	1.7%	1.6%	1.6%	1.1%
$W_E = 10,370$	23.5%	31.2%	33.3%	35.5%	37.2%	38.5%	$W_E = 10,370$	3.8%	3.2%	2.9%	2.5%	2.6%	2.5%
$W_E = 10,385$	26.4%	40.8%	46.8%	53.7%	60.8%	67.4%	$W_E = 10,385$	5.0%	5.5%	6.9%	6.0%	6.6%	5.9%
現金	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000	現金	1,000	3,000	5,000	7,000	10,000	15,000
$W_E = 10,280$	58.5%	51.9%	48.0%	46.5%	45.2%	44.0%	$W_E = 10,280$	5.0%	3.6%	2.7%	2.6%	2.1%	1.8%
$W_E = 10,310$	53.7%	36.8%	33.6%	32.1%	30.9%	29.3%	$W_E = 10,310$	7.3%	4.2%	3.0%	2.8%	2.6%	2.4%
$W_E = 10,340$	38.0%	20.2%	15.5%	13.2%	11.1%	9.4%	$W_E = 10,340$	7.7%	4.8%	3.8%	3.1%	3.7%	2.9%
$W_E = 10,370$	19.5%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	$W_E = 10,370$	9.2%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
$W_E = 10,385$	8.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	$W_E = 10,385$	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

この数値実験では、ある一定の要求期待富に対するリスク値の分布を調べるために、ER モデルを用いている。経路数が増加すると同一の期待富に対してリスクは大きくなるため、投資比率を単純に比較することはできないが、それを踏まえた上で特徴を考察する。

0時点においては、経路数が増加するにつれて、株式と CB の投資比率が増加し、現金と債券の投資比率は減少する。また、$W_E = 10,385$ の場合の債券と CB を除いて、標準偏差は経路数が増加するにつれて減少する。経路数を増加させると、サンプリング・エラーを減少させることができる。債券と CB は収益率の似た資産であり、ちょうど $W_E = 10,385$ のあたりで入れ替えが行われ、乱数シードの違いにより大きな差が出たと考えられる。線形計画問題の最適解は端点解であり、少しの入力パラメータの変動により、大きく最適解が変化する可能性があるという特徴がある。したがって、この点に関してはサンプリング・エラーだけでなく、最適解が大きく変わりやすいという特徴も考慮して分析する必要がある。

6 取引戦略の違いによる比較

2.2.2項において、投資量関数の違いによって、投資量決定戦略、投資額決定戦略、投資比率決定戦略を記述できることを示した。シナリオ・ツリー型モデルでは、どの戦略を用いても同一の最適解が得られるが、混合型モデルでは最適解は異なる。そこで、取引戦略の違いにより、どのように最適解が異なるかを数値実験により調べる。設定条件は以下の通りである。

- シミュレーション経路：10,000 本
- EU モデルを用いる。リスク回避係数には 5節と同じ 16 種類を用いる。

6.1　基本ケースの場合

図7に3種類の戦略に対する効率的フロンティア、図8に各時点の平均投資比率を示す。

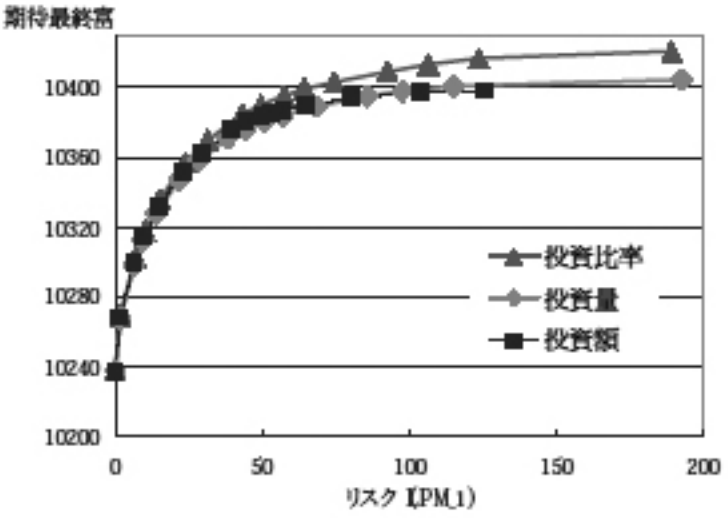

図 7：効率的フロンティア

効率的フロンティアの左下(γ の値が大きく、期待富とリスクが小さい組み合わせ)ではほぼ同じであるが、効率的フロンティアの右上(γ の値が小さく、期待富とリスクが大きい組み合わせ)にいくにつれて、投資比率決定戦略の方が投資量決定戦略に比べて、より左上に効率的フロンティアは位置している。投資額決定戦略も同様に、投資比率決定戦略よりも良い解を得ることはできない。投資比率決定戦略が投資量決定戦略や投資額決定戦略よりも有利な理由は、現金の保有に関する制約がないからである[12]。説明のため、危険資産が一つの場合を考え、できるだけ危険資産を多く買う戦略が有利だとしよう。投資量決定戦略に関しては、最も高い価格を持つ経路において、すべての富を危険資産に投資できるが、その他の経路では現金を持たざるを得ない(価格の低い経路で全額投資すると、より高い経路での投資額が富を上回ってしまう)。一方、投資額決定戦略では最も富の小さい経路においては全額を危険資産に投資できるが、その他の経路では現金を持たざるを得ない。それに対し、投資比率決定戦略ではすべての経路で富の100%を危険資産に投資することができる。投資量決定戦略および投資額決定戦略では、明示的には現金の制約を入れていないが、結果的に制約されることになる。危険資産は現金に比べて期待収益率が高いので、特に γ が小さい場合には危険資産へ多く投資するポートフォリオが望ましい。しかし、このようなポートフォリオを構成できないため、結果的に投資比率決定戦略が有利になる。

図8の γ が1 以下の場合を見てみよう。1時点と3時点では投資比率決定戦略が現金へほとんど投資をしていないのに対し、投資量決定戦略と投資額決定戦略では現金への投資を行っている。2

[12]投資量決定戦略は、危険資産への投資量を決定ノード内で同一にする必要がある。同じ決定ノードには似たような資産価格(収益率)を持つ経路が入るが、投資額は同一にならない。各経路ごとの富も同一ではないが、富と危険資産の投資額の差も経路ごとに異なり、その差は現金で持たなければならない。投資額決定戦略も同様の理由で富と危険資産の投資額の差を現金で持つ必要がある。

時点においては投資比率決定戦略でも5%～10% 投資を行っているが、投資量決定戦略と投資額決定戦略は約15%以上投資を行っている。しかも、投資比率決定戦略では γ が小さくなるにつれて現金の比率を下げているが、投資量決定戦略と投資額決定戦略ではほとんど変わりがない。

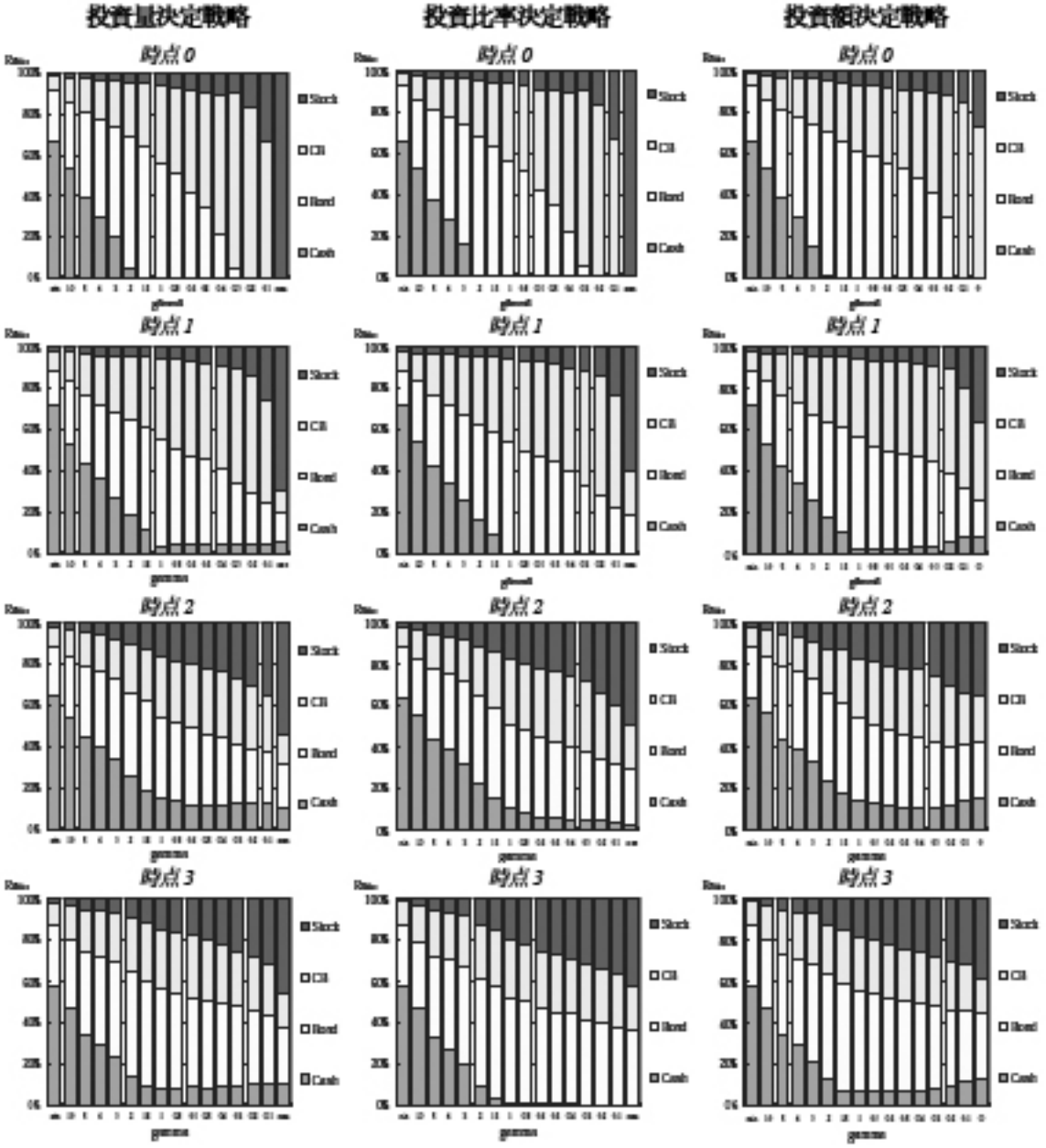

図 8：各取引戦略における平均投資比率

これらのことを確認するために、現金に 5%, 10%, 15%, 20% の4種類の下限制約を付けて問題を解いた。図9には紙面の都合上、5%, 10% のときのみ結果を示す。下限制約 5% では投資比率決定戦略が有利であるが、10% 以上の下限制約を加えると、リスク回避度によって最適解は変わるが、効率的フロンティアはどの戦略もほぼ同じになる。

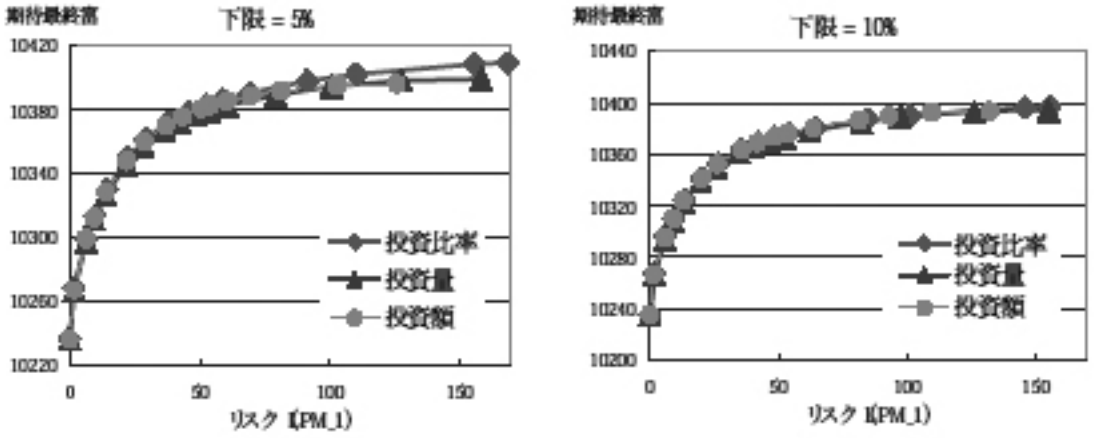

図 9：現金の下限制約を含む場合の効率的フロンティア

投資額決定戦略と投資量決定戦略を比べてみよう。投資額決定戦略は投資量決定戦略よりも効率的フロンティアの右上(γ の値が小さく、期待富とリスクが大きい組み合わせ)では不利であるが、真ん中では有利である。効率的フロンティアの左下(γ の値が大きく、期待富とリスクが小さい組み合わせ)ではほぼ同じである。効率的フロンティアの右上で投資量決定戦略が有利な理由も現金の保有に関する制約で説明できる。投資額決定戦略は最も富の小さい経路が影響を与えるのに対し、投資量決定戦略は最も高い資産価格を持つ経路が影響を与える。危険資産を複数組み合わせることによって、現金の保有に関する制約は投資額決定戦略よりも緩和できると考えられる。図8を見てみると、小さい γ に対する現金の比率は投資額決定戦略の方が高い。また、現金の保有に関する制約がきついため、実行可能領域も狭くなり、投資額決定戦略の効率的フロンティアは短い。このことは図9の5%, 10% 制約がある場合にも現れている。投資額決定戦略が効率的フロンティアの真ん中で有利な理由は基本ケースの設定条件のためと考えられる。投資額決定戦略は逆バリ戦略であり、負の相関が高いときに有利な戦略である。この点については 6.2節の相関ケースで議論する。

6.2　相関ケースの場合

各取引戦略と時系列相関の関係について調べるために、基本ケースと同じ分析を行う。図10に3種類の取引戦略に対する効率的フロンティア、図11に0時点の最適投資比率を示す。ただし、図11は紙面の都合上、cm5, cm2, cp0, cp2, cp5 の5ケースのみを示す。

図10を見ると、すべての相関パラメータ c において投資比率決定戦略の効率的フロンティアは投資量決定戦略と投資額決定戦略を上回っている。この関係は基本ケースにおいても成り立っており、取引戦略としての優位性を表している。しかし、相関パラメータ c の値によって、その関係は異なる。まずはじめに、投資比率決定戦略と投資量決定戦略を比べてみよう。相関パラメータ c の絶対値が小さい(無相関に近い)場合、投資比率決定戦略と投資量決定戦略の効率的フロン

ティアは近く、c の絶対値が大きくなるにつれて、その差は大きくなる。

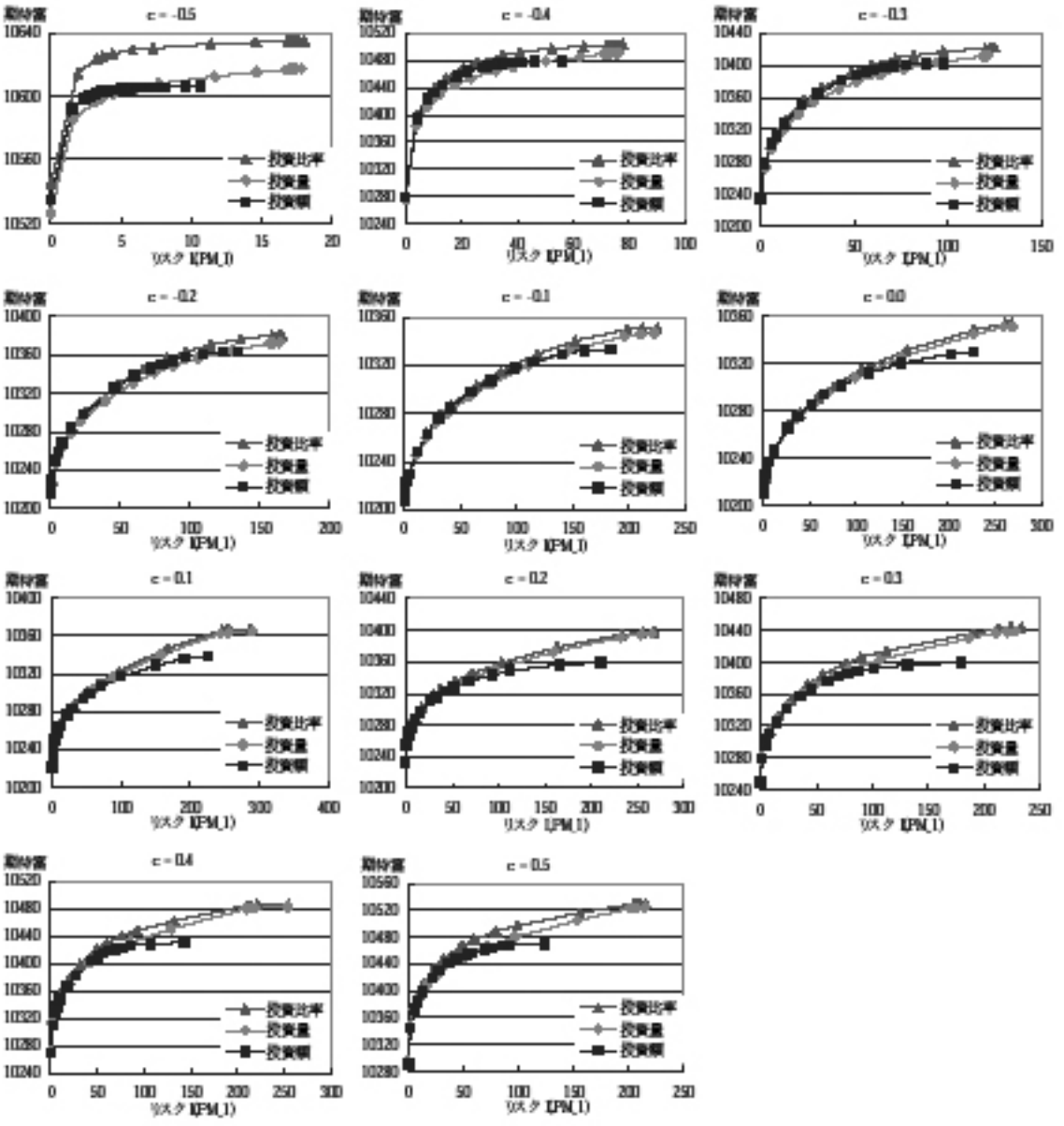

図 10：各取引戦略における効率的フロンティア

相関パラメータ c の絶対値が大きければ、将来の収益率を予想できる度合いが大きくなる。たとえば、c が大きな正の値であるならば、小さい正の値の場合に比べて、価格が上昇(下降)すれば、次期も価格は上昇(下降)しやすいことを表すからである。c の値が負の場合も同様のことが言える。したがって、より危険な資産に投資しても無相関の場合に比べて、リスク値を小さくすることができる。そのため、現金で保有するよりも株式などのより危険な資産に投資することが有利になり、現金を必ずしも保有する必要のない投資比率決定戦略が投資量決定戦略より有利になる。

図11の最適投資比率を見ると、相関パラメータ c の絶対値が大きい場合の株式への投資比率は、絶対値が小さい場合に比べて大きくなっており、このことを裏付けている。$c = -0.5$ の場合

が $c = 0.5$ の場合に比べてその差が大きいのは、時間分散効果でより多く株式に投資しやすいためである。

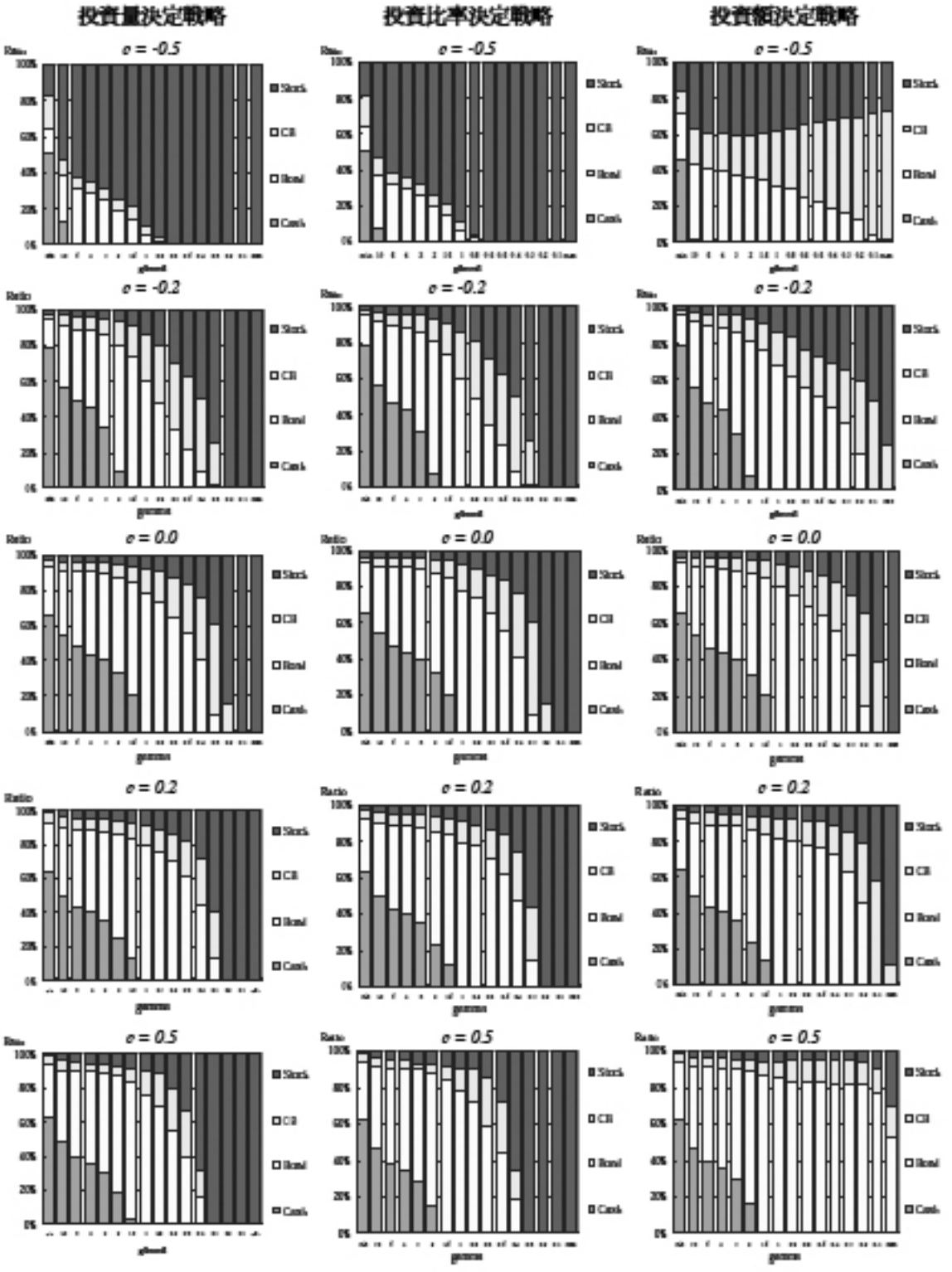

図 11：各取引戦略における平均投資比率(0時点)

図12に各取引戦略の目的関数値 EU を示す。相関パラメータ c の絶対値が大きいほど、目的関数値は大きくなる。この理由は先述したように、c の絶対値が大きければ、将来の収益率を予想できる度合いが大きくなるからである。特に c の値が大きな負値の(負相関を表す)場合、期待富の値が大きくなり、リスク値が小さくなることが図10にも現れている。

図10に戻って、投資量決定戦略と投資額決定戦略を比べてみよう。投資量決定戦略は順バリ戦略、投資額決定戦略は逆バリ戦略であるため、相関パラメータ c が0以上(正相関)の場合、投資量決定戦略の効率的フロンティアは投資額決定戦略を上回る。一方、c が負の場合、逆バリ戦略が順バリ戦略よりも有利であるため、投資額決定戦略が投資量決定戦略を上回る。ただし、γ の値が小さい場合、より危険な資産を増やし、現金を減らした方が有利なので、図7と同様に、c の値に関わらず、投資量決定戦略が投資額決定戦略を上回る。$c = -0.5$ の場合、その他の値に比べて、γ の小さいところで投資量決定戦略が投資額決定戦略を上回りやすくなる。この理由は、$c = -0.5$ では他に比べて株式への投資比率が高いため、逆バリ戦略のメリットよりも現金保有のデメリットが大きくなるためである。

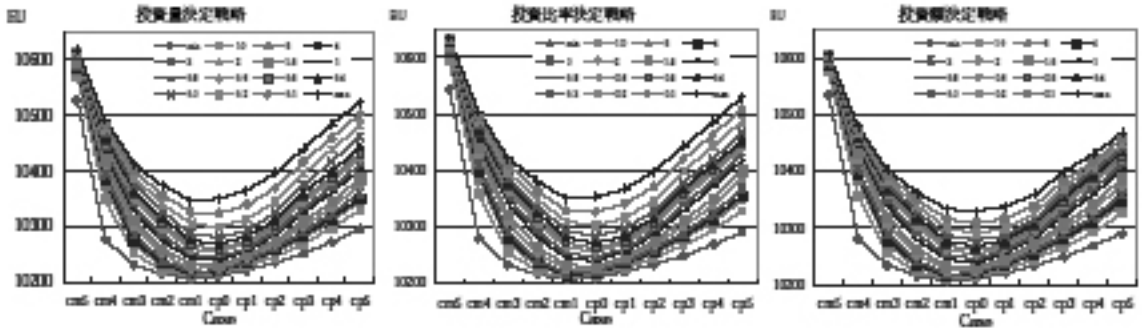

図 12：各取引戦略の目的関数値

7　結論と今後の課題

本研究では、投資量関数を用いて、混合型モデルのより一般的な定式化の方法を示した。様々な投資量パラメータを用いて様々な取引戦略を記述できることを示すことができた。さらに、拡張決定ツリーの生成方法として、逐次的クラスタリング法、ポートフォリオ・ベース・クラスタリング法の2つの方法を示し、それらを数値実験によって比較した。その結果、シミュレーション型モデルで問題を解いたときに得られる最適解を用いたポートフォリオ・ベース・クラスタリング法(S-PBC法)が最も良いという結果が得られた。ただし、シミュレーション型モデルで問題を解くときのリスク回避パラメータの値は問題に依存するので、適用する問題に応じてパラメータを設定しなければならない。

混合型モデルの特徴を調べるために、数値実験によって分岐数や経路数の違いによる影響やサンプリング・エラーについて調べた。分岐数が多くなればなるほど、効率的フロンティは左上に

シフトする。一方、経路数が多くなればなるほど、効率的フロンティアは右下にシフトする。分岐数と経路数はできる限り大きい方が望ましいが、問題の規模が大きくなるために、コンピュータ・リソースや計算時間が制約となる。分岐数と経路数の関係はまだ未解決の問題である。混合型モデルのサンプリング・エラーの問題は、収束の精度がシミュレーション型モデルよりも悪く、注意が必要である。最適な分岐数と経路数の組み合わせとサンプリング・エラーの問題は、コンピュータ・リソースの大きい環境で数値実験を行い、特徴を見いだす必要がある。

取引戦略の比較実験においては、投資比率決定戦略が他の2つの取引戦略 (投資量決定戦略、投資額決定戦略) よりも優位であることが分かった。この原因は主に現金保有に関する問題であり、ある程度現金保有を許すパラメータの設定では、あまり差がないことも分かった。

今後の課題は、上記の問題についてさらに検討することや、様々なシナリオ生成モデルに対する数値実験を行い、混合型モデルの特徴を考察することである。

参考文献

[1] 齋藤直紀, 枇々木規雄, 市場リスクと信用リスクを考慮した銀行の資産負債管理に対する確率的最適化モデル, 日本金融・証券計量・工学学会 2001年夏季大会予稿集, pp. 330–349.

[2] 多田羅智之, 枇々木規雄, 多期間確率計画モデルの年金ALMへの適用, 日本金融・証券計量・工学学会 2001年夏季大会予稿集, pp. 350–366.

[3] 枇々木規雄, 金融工学と最適化, 朝倉書店, 2001.

[4] 枇々木規雄, 戦略的資産配分問題に対する多期間確率計画モデル, *Journal of Operations Research Society of Japan*, **44**, No.2(2001), pp.169–193.

[5] 枇々木規雄, 最適資産配分問題に対するシミュレーション/ツリー混合型多期間確率計画モデル, 高橋一編, ジャフィー・ジャーナル [2001] 金融工学の新展開, 2001年6月, pp.89–119.

[6] 枇々木規雄: シミュレーション型多期間確率計画モデルに対する数値実験による考察. 日本金融・証券計量・工学学会 2002年夏季大会予稿集, 81–100.

[7] 枇々木規雄, コンパクト表現によるシミュレーション型多期間確率計画モデルの定式化, *Journal of Operations Research Society of Japan*, **45**, No.4(2002), pp.529–549.

[8] 枇々木規雄: 最適資産配分のためのシミュレーション/ツリー混合型多期間確率計画モデル — 一般的なモデル化の方法、数値実験による考察 —, 慶應義塾大学理工学部管理工学科 テクニカルレポート, No. 2004-002 (2004).

[9] 枇々木規雄, 小守林克哉, 豊田暢子：世帯の資産形成モデル, 日本保険・年金リスク学会 第2回研究発表大会予稿集 (2004), pp.75-88.

[10] 枇々木規雄, 田辺隆人： 多期間ポートフォリオ最適化問題におけるモデリング技術と実装 (計算) 技術の重要性, 高橋一, 池田昌幸編, 金融工学と資本市場の計量分析—ジャフィー・ジャーナル 2003, 2003年5月, pp.81-114.

[11] 枇々木規雄, 茶野努: 公的年金への多期間最適化モデルの適用, 慶應義塾大学理工学部管理工学科 テクニカルレポート, No. 02-002 (2002).

[12] 本多俊毅, 投資機会が変動する場合の最適ポートフォリオについて, 現代ファイナンス, **6** (1999), pp.19–45.

[13] 吉田靖, 山田泰之, 枇々木規雄: 家計の金融資産配分問題に対する多期間最適化モデル, 慶應義塾大学理工学部管理工学科 テクニカルレポート, No. 02-003 (2002).

[14] V.S. Bawa and E.B. Lindenberg, Capital Market Equilibrium in a Mean-Lower Partial Moment Framework, *Journal of Financial Economics*, **5** (1977), pp.189–200.

[15] E. Bogentoft, H. Romeijn, and S. Uryasev, Asset/Liability Management for Pension Funds Using CVaR Constraints, The Journal of Risk Finance, Fall 2001, pp.57–71.

[16] D.R. Cariño, T. Kent, D.H. Myers, C. Stacy, M. Sylvanus, A.L. Turner, K. Watanabe and W.T. Ziemba(1998), The Russel–Yasuda Kasai Model: An Asset/Liability Model for a Japanese Insurance Company Using Multistage Stochastic Programming, *Chapter 24 in* Ziemba and Mulvey[27], 609–633.

[17] D.R. Cariño and W.T. Ziemba(1998), Formulation of the Russell-Yasuda Kasai Financial Planning Model, *Operations Research*, **46**, 4, 433–449.

[18] D.R. Cariño, D.H. Myers and W.T. Ziemba(1998), Concepts, Technical Issues, and Uses of the Russell-Yasuda Kasai Financial Planning Model, *Operations Research*, **46**, 4, 450–462.

[19] W.V. Harlow, Asset Allocation in a Downside-Risk Framework, *Financial Analysis Journal*, (September-October 1991), pp.28–40.

[20] Norio Hibiki, Hybrid Simulation/Tree Stochastic Optimization Model for Dynamic Asset Allocation, Chapter 14 in *"Asset and Liability Management Tools: A Handbook for Best Practice"* edited by B. Scherer, Risk Books, pp.269-294, 2003.

[21] I. Maros and C. Mészáros, The Role of the Augmented System in Interior Point Methods, *European Journal of Operational Reserach*, **107**(1998), pp.720–736.

[22] R.C. Merton, Lifetime Portfolio Selection under Uncertainty: The Continuous-Time Case, *The Review of Econmics and Statistics*, **51** (1969), pp.247–257.

[23] J.M. Mulvey and A.E. Thorlacius(1998), The Towers Perrin global capital market scenario generation system, *Chapter 13 in* Ziemba and Mulvey[27], 286–312.

[24] J.M. Mulvey and W.T. Ziemba, Asset and Liability Allocation in a Global Environment, Chapter 15 in *"Handbooks in OR & MS, Vol.9", edited by R.Jarrow et al., 1995.*
(**邦訳：枇々木規雄：グローバル環境における資産負債配分**, **第**15**章**, **今野浩**, **古川浩一編著**, **ファイナンスハンドブック**, 1997.)

[25] J.M. Mulvey and W.T. Ziemba, Asset and Liability Management Systems for Long-Term Investors: Discussion of the Issues, Chapter 1 in *"Worldwide Asset and Liability Modeling", edited by W.T. Ziemba and J.M. Mulvey, 1998.*

[26] P.A. Samuelson, Lifetime Portfolio Selection by Dynamic Stochastic Programming, *The Review of Econmics and Statistics*, **51** (1969), pp.239–246.

[27] W.T. Ziemba and J.M. Mulvey (eds.)(1998), Worldwide Asset and Liability Modeling, Cambridge University Press.

既刊「総合政策学ワーキングペーパー」一覧 *

番号	著者	論文タイトル	刊行年月
1	小島朋之 岡部光明	総合政策学とは何か	2003 年 11 月
2	Michio Umegaki	Human Security: Some Conceptual Issues for Policy Research	November 2003
3	藤井多希子 大江守之	東京圏郊外における高齢化と世代交代 ―高齢者の安定居住に関する基礎的研究―	2003 年 11 月
4	森平爽一郎	イベントリスクに対するデリバティブズ契約	2003 年 11 月
5	香川敏幸 市川　顕	自然災害と地方政府のガバナンス ～ 1997 年オーデル川大洪水の事例～	2003 年 12 月
6	厳　網林 松崎　彩 鳴原美可子	地域エコシステムのマッピングとエコシステムサービスの評価 ―地域環境ガバナンスのための GIS ツールの適用―	2003 年 12 月
7	早見　均 和気洋子 吉岡完治 小島朋之	瀋陽市康平県における CDM（クリーン・デベロプメント・メカニズム）の可能性と実践：ヒューマンセキュリティに向けた日中政策協調の試み	2003 年 12 月
8	白井早由里	欧州の通貨統合と金融・財政政策の収斂 ―ヒューマンセキュリティと政策対応―	2003 年 12 月
9	岡部光明	金融市場の世界的統合と政策運営 ―総合政策学の視点から―	2003 年 12 月
10	駒井正晶	PFI 事業の事業者選定における価格と質の評価方法への総合政策学的接近	2003 年 12 月
11	小暮厚之	生命表とノンパラメトリック回帰分析 ―我が国生保標準生命表における補整の考察―	2004 年 1 月
12	Lynn Thiesmeyer	Human Insecurity and Development Policy in Asia: Land, Food, Work and HIV in Rural Communities in Thailand	January 2004
13	中野　諭 鄭　雨宗 王　雪萍	北東アジアにおけるヒューマンセキュリティをめぐる多国間政策協調の試み：日中韓三国間の CDM プロジェクトの可能性	2004 年 1 月

* 各ワーキングペーパーは、当 COE プログラムのウエブサイトに掲載されており、そこから PDF 形式で全文ダウンロード可能である（但し一部の例外を除く）。ワーキングペーパー冊子版の入手を希望される場合は、電子メールで当プログラムに連絡されたい（coe2-sec@sfc.keio.ac.jp）。また当プログラムに様々なかたちで関係する研究者は、その研究成果を積極的に投稿されんことを期待する（原稿ファイルの送信先：coe2-wp@sfc.keio.ac.jp）。なお、論文の執筆ならびに投稿の要領は、当プログラムのウエブサイトに掲載されている。
当プログラムのウエブサイト　<http://coe21-policy.sfc.keio.ac.jp/>

14	吉岡完治 小島朋之 中野　諭 早見　均 桜本　光 和気洋子	瀋陽市康平県における植林活動の実践： ヒューマンセキュリティの日中政策協調	2004 年 2 月
15	Yoshika Sekine, Zhi-Ming YANG and Xue-Ping WANG	Air Quality Watch in Inland China for Human Security	February 2004
16	Patcharawalai Wongboonsin	Human Security and Transnational Migration: The Case in Thailand	February 2004
17	Mitsuaki Okabe	The Financial System and Corporate Governance in Japan	February 2004
18	Isao Yanagimachi	Chaebol Reform and Corporate Governance in Korea	February 2004
19	小川美香子 梅嶋真樹 國領二郎	コンシューマー・エンパワーメント技術 としての RFID ―日本におけるその展開―	2004 年 2 月
20	林　幹人 國領二郎	オープンソース・ソフトウェアの開発メカニズム ―基幹技術開示によるヒューマンセキュリティ―	2004 年 2 月
21	杉原　亨 國領二郎	学生能力を可視化させる新しい指標開発 ―経過報告―	2004 年 2 月
22	秋山美紀	診療情報の電子化、情報共有と個人情報保護に ついての考察―ヒューマンセキュリティを実現 する制度設計に向けて―	2004 年 3 月
23	飯盛義徳	地域活性化におけるエージェントの役割 ―B2B システムによる関係仲介とヒューマン セキュリティ―	2004 年 3 月
24	山本悠介 中野　諭 小島朋之 吉岡完治	太陽光発電のユーザーコストと CO_2 削減効果： 大学におけるヒューマンセキュリティへの具体的 取組みに向けて	2004 年 3 月
25	Jae Edmonds	Implications of a Technology Strategy to Address Climate Change for the Evolution of Global Trade and Investment	March 2004
26	Bernd Meyerab Christian Lutza Marc Ingo Woltera	Economic Growth of the EU and Asia. A First Forecast with the Global Econometric Model GINFORS	March 2004
27	Wei Zhihong	Economic Development and Energy Issues in China	March 2004
28	Yoginder K. Alagh	Common Futures and Politics	March 2004

29	Guifen Pei Sayuri Shirai	China's Financial Industry and Asset Management Companies—Problems and Challenges—	April 2004
30	Kinnosuke Yagi	Decentralization in Japan	April 2004
31	Sayuri Shirai	An Overview of the Growing Local Government Fiscal Problems in Japan	April 2004
32	Sayuri Shirai	The Role of the Local Allocation Tax and Rerorm Agenda in Japan—Implication to Developing Countries—	April 2004
33	山本　聡 白井早由里	経済安定の基盤としての地方自治体の財源問題 —地方交付税のフライペーパー効果とその実証分析—	2004 年 4 月
34	岡部光明 藤井　恵	日本企業のガバナンス構造と経営効率性 —実証研究—	2004 年 4 月
35	須子善彦 國領二郎 村井　純	知人関係を用いたプライバシ保護型マッチング システムの研究	2004 年 4 月
36	渡部厚志	「移動の村」での生活史：「人間の安全」としての 移動研究試論	2004 年 4 月
37	厳　網林	自然資本の運用による環境保全と社会発展のための フレームワークの構築—チンハイ・チベット高原を 事例として—	2004 年 4 月
38	榊原清則	知的メインテナンス・システムの構築をめざす アメリカの産学官連携プロジェクト	2004 年 5 月
39	白井早由里 唐　成	中国の人民元の切り上げについて —切り上げ効果の検証と政策提言—	2004 年 5 月
40	草野　厚 岡本岳大	対中国 ODA に関するメディア報道の分析 —新聞報道の比較を中心に—	2004 年 5 月
41	草野　厚 近藤　匡	政策決定過程におけるマスメディアの機能 —イージス艦派遣をめぐる議論における新聞報道 の影響—	2004 年 5 月
42	草野　厚 古川園智樹 水谷玲子	視聴率の代替可能性—メディア検証機構に焦点を 当てて—	2004 年 5 月
43	中川祥子	「信頼の提供」に基づいた NPO と行政のパートナー シップ・モデルの提示	2004 年 5 月
44	安西祐一郎	ヒューマンセキュリティへの総合政策学アプローチ	2004 年 5 月
45	小倉　都	日本における再生医療ビジネスの課題とベンチャー 企業の取り組み—ジャパン・ティッシュ・エンジニ アリングの事例分析について—	2004 年 7 月
46	伴 英美子	高齢者介護施設における従業員のバーンアウトに	2004 年 7 月

47	伊藤裕一	「開かれた政策協調手法」の発展とその評価 ― EU 雇用政策分野における取組みを中心に―	2004 年 7 月
48	Hideki Kaji Kenichi Ishibashi Yumiko Usui	Human Security of the Mega-cities in East and South-East Asia	July 2004
49	Takashi Terada	Thorny Progress in the Institutionalization of ASEAN+3: Deficient China–Japan Leadership and the ASEAN Divide for Regional Governance	July 2004
50	Sayuri Shirai	Recent Trends in External Debt Management Practices, Global Governance, and the Nature of Economic Crises —In Search of Sustainable Economic Development Polices—	September 2004
51	Sayuri Shirai	Japan, the IMF and Global Governance —Inter-Disciplinary Approach to Human Security and Development—	September 2004
52	Sarunya Benjakul	Equity of Health Care Utilization by the Elderly Population in Thailand during the Periods of the Economic Bubble and after the Economic Crisis: Human Security and Health Policy Options	September 2004
53	中林啓修	先進国の治安政策と「人間の安全保障」 ― EU 司法・内務政策を巡る考察―	2004 年 9 月
54	Yuichi Ito	Globalisation, Regional Transformation and Governance ― The Case of East Asian Countries ―	January 2005
55	孫　前進 陳　宏 香川敏幸	东北亚经济空间形成中的流通环境分析 [中国語論文]	2005 年 1 月
56	厳　網林 小島朋之 早見　均	运用京都协议书清洁开发机制 (CDM) 构筑可持续的 植树造林机制―日本庆应义塾大学与中国沈阳市 林业局合作造林的实践经验―[中国語論文]	2005 年 1 月
57	白井早由里	開発援助（ODA）のもたらすマクロ経済問題 ―総合政策学アプローチに向けて―	2005 年 1 月
58	白井早由里	援助配分・供与についての新しいアプローチ ―ヒューマン・セキュリティとミレニアム開発 目標の達成に向けて―	2005 年 1 月
59	小暮厚之	多変量保険リスク管理への共単調性アプローチ ―ヒューマンセキュリティへの基盤研究―	2005 年 4 月
60	枇々木規雄	動的投資決定のための多期間ポートフォリオ 最適化モデル―ヒューマンセキュリティへの 基盤研究―	2005 年 4 月
61	松山直樹	変額年金保険のリスク管理（現状と課題） ―ヒューマンセキュリティへの基盤研究―	2005 年 4 月
62	工藤康祐 小守林克哉	EIA（株価指数連動型年金）に含まれるオプション性 について―ヒューマンセキュリティへの基盤研究―	2005 年 4 月

63	田中周二	第三分野保険（医療、就業不能、介護）の経験表の作成について―ヒューマンセキュリティへの基盤研究―	2005 年 4 月
64	田中周二	大論争「現行アクチュアリー実務は間違っているのか」―ヒューマンセキュリティへの基盤研究―	2005 年 4 月
65	厳　網林 宮坂隆文	衛星データによる砂漠化進行の時系列分析と農業政策による影響の考察―中国内蒙古自治区ホルチン砂地を事例として―	2005 年 4 月
66	中林啓修	司法・内務分野における EU の対中東欧支援政策―「人間の安全保障」実現にむけた国際協力構築の一形式―	2005 年 4 月
67	青木節子	宇宙の軍事利用を規律する国際法の現状と課題	2005 年 4 月
68	青木節子	適法な宇宙の軍事利用決定基準としての国会決議の有用性	2005 年 4 月
69	岡部光明 光安孝将	金融部門の深化と経済発展 ―多国データを用いた実証分析―	2005 年 4 月
70	森平爽一郎 神谷信一	日本の家計はバブル崩壊以降危険回避的であったのか？	2005 年 4 月
71	小暮厚之 長谷川知弘	将来生命表の統計モデリング : Lee-Carter 法とその拡張 ―ヒューマンセキュリティへの基盤研究―	2005 年 4 月

「総合政策学ワーキングペーパー」投稿要領

2004 年 12 月 22 日改訂

1.（シリーズの目的） 当ワーキングペーパーシリーズは、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「日本・アジアにおける総合政策学先導拠点 --- ヒューマンセキュリティの基盤的研究を通して」の趣旨に沿って行われた研究成果をタイミングよく一般に公開するとともに、それに対して幅広くコメントを求め、議論を深めていくことにあります。このため編集委員会は、同プログラム事業推進担当者 30 名（以下 COE 推進メンバーという。当 COE ウエブページに氏名を掲載）またはその共同研究者等（下記の 4 を参照）による積極的な投稿を期待しています。なお、主として研究論文を集録する当シリーズとは別に、専ら研究資料を集録するために「総合政策学研究資料シリーズ（Policy and Governance Research Data and Document Series）」を 2004 年 6 月に新たに創設しました。当 COE の研究領域や研究内容等はウエブページ（本稿末尾）をご参照ください。

２.（集録論文の性格） シリーズに集録する論文は、原則として日本語、英語、または中国語で書かれた論文とします。集録対象は、未発表論文だけでなく、学会報告済み論文、投稿予定論文、研究の中間報告的な論文、当 COE 主催ワークショップ等における報告論文、シリーズの趣旨に合致する既発表論文（リプリント）など、様々な段階のものを想定していますが、性格的には原則として研究論文といえるものとします。集録論文のテーマは比較的広く設定しますが、上記趣旨に鑑み、原則として総合政策学ないしその方法論、あるいはヒューマンセキュリティに関連するものとします。このため、論文主題、論文副題、あるいは論文概要のいずれかにおいて原則として「総合政策学」または「ヒューマンセキュリティ」という用語のいずれか（または両方）が入っていることを当シリーズ採録の条件とします。

３.（投稿の方法） 投稿は、論文の文書ファイル（図表等が含まれる場合はそれらも含めて一つのファイルにしたもの）を電子メールによって下記にあてて送信してください。文書ファイルは、原則として MS-Word または LaTeX で書かれたものとします。後者による場合には、既刊ワーキングペーパーの様式に準じて作成していただき、そのまま印刷できる様式のもの（camera-ready manuscript）をご提出ください。なお、投稿の締切り期限は特に設けず、随時受け付けます。

４.（投稿資格） 当 COE 推進メンバーおよび慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスの専任教員は直接投稿できるものとしますが、それ以外の研究協力者（共同研究者あるいは当 COE リサーチアシスタント等）は必ず当 COE 推進メンバーを経由して投稿してください。この場合、経由者となる COE 推進メンバーは、論文の内容や形式等を十分に点検するとともに必要な修正を行い、責任が持てる論文にしたうえで提出してください。投稿論文は、その著者としてＳＦＣ修士課程学生やＳＦＣ学部学生を含む共著論文であってもかまいません（ただし学部学生は第一著者にはなれません）。著者としてＳＦＣ大学院以外の大学院生を含む場合には、修士課程学生は第一著者になれず、また博士課程学生も原則として第一著者になれません。研究協力者がＳＦＣの内部者、外部者のいずれの場合でも、投稿論文の著者（複数著者の場合はそのうち少なくとも１名）は博士課程在籍中の学生またはそれ以上の研究歴を持つ研究者（当 COE 推進メンバーおよび慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスの専任教員はこれに含まれる）であることを条件とします。

５.（論文査読の有無） シリーズの趣旨に鑑み、一般の学術専門誌のような論文査読は行わず、できるだけ幅広く集録してゆく方針です。ただし、シリーズの趣旨に合致する論文とは言いがたいと編集委員会が判断する場合には、編集委員会は、１）当該論文の採録を見送る、２）掲載するうえで必要な改訂（体裁その他の点）を著者にお願いする、３）当シリーズではなく「総合政策学研究資料シリーズ」への採録に回す、などの対応をとることがあります。編集委員会が投稿原稿を受理した場合、通常 10 日以内に必要な改訂の有無を執筆者に電子メールで直接ご連絡します。なお、集録が決定した場合、鮮明な印刷原紙作成のために図表等の原データ（例えば Photoshop EPS など）の提出をお願いする場合があります。

６.（投稿料・原稿執筆料）　投稿料は不要です。一方、原稿執筆料は支払われません。集録論文の著者には当該ワーキングペーパーを原則として 40 部進呈いたします（それ以上の場合も十分対応できますので申し出て下さい）。

７.（著作権）　ワーキングペーパーの著作権は、当該論文の執筆者に帰属します。

８.（公開方法）　本シリーズに含まれる論文は、編集委員会が統一的な様式に変換したうえで冊子体に印刷して公開します（既刊論文をご参照。なお提出原稿にカラー図表等が含まれていても構いませんが、それらは冊子印刷に際しては全てモノクロとなります）。またウエブ上においても、原則としてすべての論文を PDF ファイル形式でダウンロード可能なかたちで掲載し、公開します。

９.（原稿執筆要領）　提出原稿の作成にあたっては、次の点に留意してください。

１）A4 版、横書き、各ページ１列組み（２列組みは不可）。

２）活字サイズは、日本語または中国語の場合 10.5 ～ 11 ポイント、英語の場合 11~12 ポイントとする。１ページあたりの分量は、日本語または中国語の場合１ページ 40 字 30 行、英語の場合１ページ 30 行をそれぞれ目安とする。（これら３つの言語以外の言語による場合は適宜読み替える。以下同様。）

３）タイトルページ（１枚目）には、論題、著者名、著者の所属と肩書き（大学院生に場合には修士課程在学中か博士課程在学中かを明記のこと）、著者の電子メールアドレスのほか、必要に応じて論文の性格（学会発表の経緯など）や謝辞を記載。「COE の研究成果である」といえる場合には必ずその旨を記載する。なお、日本語論文の場合は、論題（メインタイトルおよびサブタイトル）ならびに著者名の英語表示もページ下方に適宜記載する（当該論文には印刷しないが、英文ワーキングペーパー末尾に付ける既刊一覧表で必要となるため）。

４）その次のページ（２枚目）には、論題、著者名、概要、キーワード（4-6 つ程度）を記載。概要は必須とし、一つのパラグラフで記載する。その長さは 7-12 行（日本語論文または中国語論文の場合は 250 字 -400 字程度、英文論文の場合は 150 語程度）を目安とし、単に論文の構成を記述するのではなく分析手法や主な結論など内容面での要約も必ず記述する。なお、中国語論文の場合の概要は、中国語に加え、英語または日本語でも付けること。

５）本文は、その次のページ（３枚目）から始める。

６）タイトルページを第１ページとし、論文全体に通しページ（下方中央）を付ける。

７）注は、論文全体として通し番号をつけ、該当ページの下方に記載する（論文の最後にまとめて記載するのではなく）。

８）図と表は区別し、それぞれ必ずタイトルをつける。またそれぞれ通し番号をつける。それぞれの挿入箇所を明示する（図表自体は論文末尾に一括添付する）か、あるいは本文中に直接はめ込むか、いずれでもよい。

９）引用文献は、本文の最後にまとめて記載する。その場合、日本語文献、外国語文献の順。日本語文献は「あいうえお」順、外国語文献は「アルファベット」順。

10）文献リストには、引用した文献のみを記載し、引用しなかった文献は記載しない。

11）論文の長さは、特に制約を設けないが、研究論文として最も一般的な長さと考えられるもの（本文が 15-30 ページ程度）を目安とする。

10.（投稿要領の改訂）　投稿要領の最新時点のものは、随時、当 COE のウエブページに掲載します。

論文の投稿先：　coe2-wp@sfc.keio.ac.jp
論文冊子の入手その他：　coe2-sec@sfc.keio.ac.jp
論文の PDF 版（COE ウエブページ）：　http://coe21-policy.sfc.keio.ac.jp/

ワーキングペーパーシリーズ編集委員：　岡部光明（編集幹事）、梅垣理郎、駒井正晶